

4 августа 2019 г. исполняется 120 лет со дня рождения выдающегося учёного, пионера отечественного газотурбостроения, заслуженного деятеля науки и техники РФ Владимира Васильевича Уварова¹

ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ ПРОФЕССОРА В.В. УВАРОВА

Академик А.И. ЛЕОНТЬЕВ,
кандидат технических наук В.Л. ИВАНОВ
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

DOI: 10.7868/S0233361919010014

Более семидесяти лет назад, в начале 1948 г. на московском авиационном моторостроительном заводе № 41, где главным конструктором был профессор МВТУ им. Н.Э. Баумана В.В. Уваров, начались испытания

изготовленного по его проекту первого в мире высокотемпературного турбовинтового двигателя Э-3081 мощностью 2600 кВт (рис. 1, рис. 2). Термодинамические параметры, схема двигателя и основные конструктивные решения, принятые В.В. Уваровым, носили абсолютно оригинальный характер: при разработке двигателя Э-3081 и более ранних моделей (ГТУ-1, ГТУ-2, ГТУ-3, Э-3080) **нигде в мире аналогов и даже самого понятия “турбовинтовой двигатель” не существовало**².

¹Использованные источники:

Владимир Васильевич Уваров: конструктор, учёный, педагог, патриот. Сборник к юбилейному заседанию Всесоюзного научно-технического семинара имени профессора В.В. Уварова, посвященного 50-летию создания первого высокотемпературного авиационного двигателя и 90-летию со дня рождения его конструктора. Под редакцией В.Е. Михальцева, И.Г. Суровцева. Изд. МГТУ, 1989 г.

В.С. Бекнев, В.Л. Иванов. Возможный способ повышения мощности и экономичности стационарных и комбинированных энергетических установок с газовыми турбинами. Теплоэнергетика. 2005. № 6.

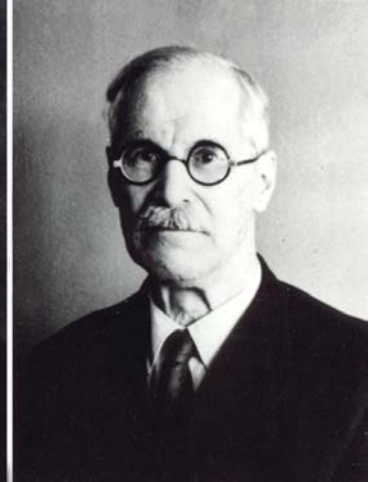
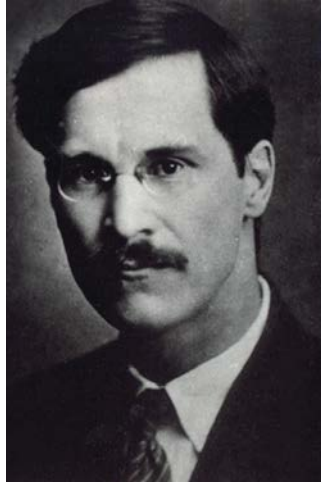
В.А. Зрелов. Отечественные газотурбинные авиадвигатели.

А.Н. Арбеков, В.Л. Иванов, Э.А. Манушин и др. под редакцией А.Ю. Вараксина. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М. Изд. МГТУ им. Баумана, 2017. С. 677.

В.Л. Иванов. 115 лет со дня рождения Владимира Васильевича Уварова и 65 лет со дня образования кафедры газовых турбин в МГТУ им. Баумана. Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Баумана. Электрон. журнал. 2014. № 9. С. 1–10. Материалы архива В.В. Уварова.

²Турбовинтовой двигатель состоит из воздушно-го винта с редуктором, компрессора, камеры сгорания, турбины и выходного устройства – сопла. Компрессор нагнетает и сжимает воздух, направляя его в камеру сгорания, куда впрыскивается топливо. Горючая смесь, полученная при смешивании воздуха с топливом, воспламеняется, образуя газы с высокой потенциальной энергией, которые, расширяясь, поступают на лопасти турбины, вращая её, а сама турбина вращает воздушный винт и компрессор. Энергия, не потраченная на вращение турбины, выходит в виде потока воздуха с продуктами сгорания через сопло, образуя реактивную тягу, величина которой не превышает 10% от общей тяги мотора, в отличие от реактивного двигателя, в котором выработанная полезная энергия полностью выходит через сопло, образуя реактивную тягу.

Созданием этих двигателей подводился итог многолетней работы В.В. Уварова по внедрению газотурбинных двигателей изобарического цикла ($p = \text{const}$) в авиацию, начатой в МВТУ по инициативе и под научным руководством профессора МВТУ Николая Романовича Брилинга в далёком 1925 г., который поручил своему бывшему дипломнику и начинающему преподавателю непосредственно руководить работой небольшой исследовательской Газовой группы.



Владимир Васильевич Уваров

Расчётно-теоретические исследования термодинамического цикла газотурбинного двигателя, экспериментальные исследования процесса истечения высокотемпературного газа через охлаждаемый сопловой аппарат турбины, выполненные в 1925–1930 гг., привели к важнейшим для отечественного авиадвигателестроения выводам.

Во-первых, несмотря на достаточно успешный опыт использования немногочисленных газотурбинных установок Г. Хольцварта³, работающих по изохорическому⁴ циклу, будущее принадлежит более лёгкому и более простому газотурбинному двигателю (ГТД), работающему по циклу с постоянным давлением сгорания. **Во-вторых**, для реализации приемлемых значений КПД такого двигателя (с учётом низких значений КПД лопаточных машин того

времени, особенно компрессора) температура газа перед турбиной должна быть не ниже 1400–1500 К. А в связи с отсутствием конструкционных материалов, способных нести нагрузку при столь высокой температуре, лопатки турбины должны быть охлаждаемыми. И, наконец, **главный вывод: сфера применения газотурбинного двигателя изобарического цикла может быть достаточно широкой, но прежде всего – это авиация. Благодаря малой удельной массе и возможности реализовать большую мощность в одном агрегате такой двигатель позволит значительно улучшить лётные качества самолёта (скорость и высоту полёта), чего не способен обеспечить поршневой двигатель.**

Для реализации столь важных выводов предстояло найти заинтересованного “потребителя”. В 1930 г. В.В. Уваров устанавливает контакт и находит поддержку у начальника ГУАП⁵ С.О. Макаровского, сумевшего оценить зна-

³Немецкий учёный доктор Хольцварт провёл обширные экспериментальные работы, основанные на глубоких теоретических исследованиях. Начиная с 1908 г. по его проектам было построено несколько газотурбинных установок. Наибольший КПД, который был получен в опытах с турбинами Хольцварта, за период до 1927 г. составил 14%. <http://foraenergy.ru/istoriya-sozdaniya-gazoturbinnyyx-ustanovok/>

⁴Цикл при постоянном объёме $v = \text{const}$.

⁵Главное управление авиационной промышленности.

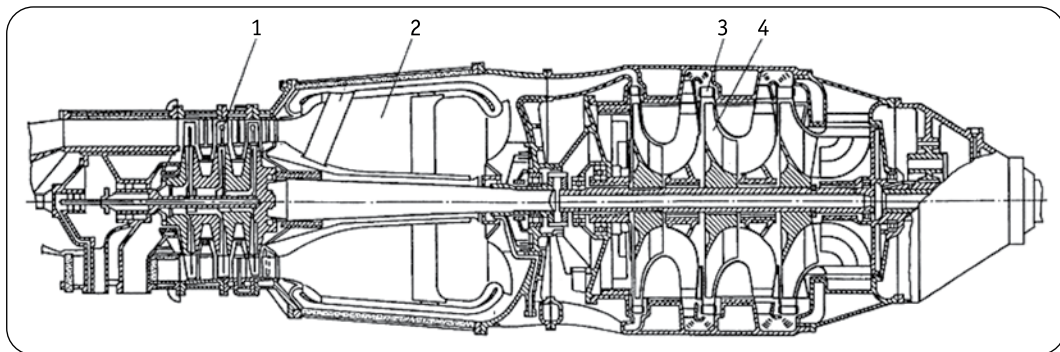
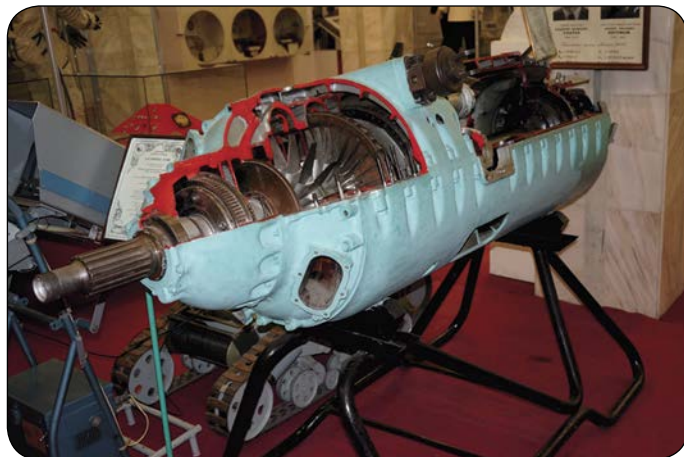


Рис. 1.
 Схема опытного турбовинтового двигателя Э-3081 мощностью 2600 кВт:
 1 – газовая турбина, 2 – камера сгорания,
 3 – воздушная турбина, 4 – ступень компрессора.

чение газотурбинного двигателя для авиации и оказавшего работе поддержку⁶. Расширение фронта работ требовало соответствующей материальной базы. По предложению Н.Р. Брилинга, поддержанного директором Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) профессором МВТУ Л.К. Рамзиным, работы переносятся в ВТИ, где сначала в составе Машинной лаборатории создаётся “Газовая группа”, а позднее уже самостоятельная Газотурбинная лаборатория. В силу обстоятельств от участия в дальнейших работах отходит Н.Р. Брилинг. Последующие многолетние работы по газотурбинному двигателю выпол-

няются под руководством В.В. Уварова, назначенного руководителем лаборатории. С этого момента вся дальнейшая профессиональная жизнь Владимира Васильевича Уварова (он скончался 09.10.1977 г.) будет посвящена служению одной музее – газотурбинному двигателю широкого спектра практического применения. Он становится и главным конструктором, и главным теоретиком, и главным идеологом-пропагандистом газотурбинного двигателя.

Рис. 2.
 Опытный высокотемпературный авиационный турбовинтовой двигатель В.В. Уварова (из фондов Музея истории МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Москве).
 Фото В.Л. Иванова.



⁶В.В. Уваров. Становление и развитие в МВТУ специальности “Газотурбинные и комбинированные двигатели”. 1977. (Сборник к 50-летию первого высокотемпературного авиационного двигателя и 90-летию со дня рождения его конструктора. Изд. МГТУ. 1989).

Одновременно В.В. Уваров продолжает педагогическую работу в МВТУ, где по его инициативе с 1931 г. сначала в качестве факультативного, а затем обязательного вводится курс “Газовые турбины”, который он сам преподаёт. Одновременно его приглашают преподавать такой же курс в Военно-воздушной академии РККА (впоследствии Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского), где также начинается подготовка военных инженеров по газотурбинной специальности.

Школа В.В. Уварова

Цикл обучения газотурбинистов В.В. Уваровым строится по-новому: академические занятия студентов МВТУ и слушателей академии сочетаются с проектно-экспериментальными работами в газотурбинной лаборатории. Под руководством В.В. Уварова впервые выполняются дипломные проекты по авиационным газотурбинным двигателям. Первым инженером-газотурбинистом становится выпускник МВТУ 1932 г., впоследствии многолетний соратник В.В. Уварова М.И. Востриков, внёсший весомую лепту в становление отечественного авиационного газотурбостроения. Молодые инженеры – бывшие дипломники В.В. Уварова пополняют коллектив лаборатории, становятся его сподвижниками на многие годы. Это выпускники разных лет, имена которых также будет хранить история развития этого направления: Я.Т. Ильичёв (1933 г.), Б.А. Уваров (1934 г.), В.Х. Абианц (1935 г.), А.А. Лакштовский (1936 г.), П.К. Казанджан (1936 г.), О.И. Голубева (1937 г.), А.Г. Романов (1940 г.), В.Е. Михальцев, А.Ф. Пронкин, С.М. Шляхтенко (1941 г.), Г.Ю. Степанов (1946 г.).

Тематика дипломных проектов напрямую связывается с работами газотурбинной лаборатории. Например, темой дипломного проекта В.Х. Абианца был

турбовинтовой двигатель для самолёта “Максим Горький”. В каждый дипломный проект включаются элементы нового: разработка какого-либо элемента конструкции, расчётно-теоретический анализ или экспериментальное исследование важного элемента ГТД. Например, в дипломном проекте В.Х. Абианца исследовалось влияние радиального зазора над рабочей лопаткой на КПД турбинной ступени турбины. Педагогический процесс, проектирование, испытания экспериментальных моделей и натурального двигателя формировали огромный теоретический и экспериментальный материал, позволявший В.В. Уварову и его сотрудникам постепенно создавать основы теории расчёта и проектирования газотурбинных двигателей. Сложившаяся в 1930-х гг. традиция вовлечения студентов в НИР кафедры, выполнение курсовых и дипломных проектов в тесной связи с тематикой текущих научных работ кафедры позволяет не только поддерживать высокий “градус” педагогической квалификации, но и через выпускников распространять научные взгляды и разработки кафедры в промышленность, НИИ и КБ страны. В предисловии к монографии “Газовые турбины и газотурбинные установки” (1970 г.) В.В. Уваров пишет: “...учитель не только учит, но и учится у своих учеников, и с этой точки зрения предлагаемую книгу можно рассматривать как совместный труд автора с огромным числом ... учеников, которые получили свои дипломы за более чем сорокалетний период его работы в МВТУ”.

Тернистый путь турбовинтового газотурбинного двигателя

В январе 1934 г. В.В. Уварова приглашают на НТС ЦИАМ с докладом об авиационном турбовинтовом газотурбинном двигателе, результатах экспериментального исследования основных

агрегатов и полнокомплектной мало-размерной модели ГТУ-1, а также о разработке проекта полномасштабного турбовинтового двигателя ГТУ-3. Работа получает высокую оценку специалистов ЦИАМ, а в положительном заключении научно-технического совета работы по созданию ГТУ-3 рекомендуется интенсифицировать.

Газотурбинный двигатель В.В. Уварова заинтересовал также маршала М.Н. Тухачевского, увидевшего в газотурбинном двигателе большое будущее для военной авиации. По его приглашению В.В. Уваров с аналогичным докладом выступил на заседании Совета труда и обороны. Турбовинтовой двигатель вызвал большой интерес у военных. Но ведущие конструкторы авиационных поршневых двигателей, приглашённые на заседание, к газотурбинному двигателю интереса не проявили. Известный конструктор авиационных дизелей А.Д. Чаромский назвал В.В. Уварова фантастом, а газотурбинный двигатель малопригодным для авиации.

С такими характеристиками пионерских работ Владимир Васильевич столкнётся ещё не однажды. Но он упорно будет отстаивать газотурбинный двигатель, газотурбинную установку, сфера применения которых необъятна. Время постепенно подтверждало его правоту.

При завершении проекта двигателя ГТУ-3 возникла проблема поиска изготовителя, по понятным причинам вне предприятий авиационной промышленности. Владимир Васильевич имел дар увлекать и убеждать – изготовить первый ТВД согласился Коломенский паровозостроительный завод. В 1937 г. двигатель был изготовлен. В 1938 г., 80 лет назад, начались первые его испытания. Обычно за пультом стоял главный конструктор двигателя В.В. Уваров. Машина пускалась легко, быстро набирала обороты, но на расчётный режим не выходила. И начался сложный процесс доводки: поиск причин отклонения от расчётных

параметров, их объяснения и устранения, а также многое другое. Всё это было впервые!

Так в трудах, познании и преодолении обнаруженных ошибок рождался первый отечественный опыт создания и доводки газотурбинного двигателя. Например, недостаточная эффективность турбины, выявленная при испытаниях ГТУ-3 и последующих испытаниях двигателей Э-3080, Э-3081, привела к пересмотру традиционного на тот период времени метода профилирования лопаток турбины. Результаты проведённых исследований впоследствии были представлены в работах В.В. Уварова "К расчёту гидродинамических решёток" и "Профилирование длинных лопаток газовых и паровых турбин"⁷ (вскоре все турбинисты, не только отечественные, стали проектировать лопатки с закруткой по высоте "по методу Уварова"). Были решены проблемы высотного двигателя, в частности проблема рационального распределения тяги между воздушным винтом и реактивным соплом, результаты которых обобщены в работе В.В. Уварова "Характеристика газовой турбины с винтом"⁸.

Любимой ученицей В.В. Уварова, "который в целом весьма скептически относился к роли женщин в науке"⁹, Ольгой Ивановой Голубевой был разработан метод расчёта температурного поля охлаждаемой лопатки¹⁰, послуживший стартовой площадкой для разработки численных методов расчёта температурного поля лопатки с внутренней системой охлаждения. Под руководством В.В. Уварова были выполнены многие другие исследования,

⁷ Труды ЦИАМ № 89, 1945 г.; Труды ЦИАМ № 99, 1945 г.

⁸ Труды ЦИАМ № 105, 1945 г.

⁹ Татьяна Михальцева. "Всеволод Евгеньевич Михальцев. Попытка объективной биографии". Москва. 2017. С. 31.

¹⁰ "К определению температурного поля лопаток газовых турбин". Труды ЦИАМ № 129, 1947 г.

результаты которых опубликованы в специальной литературе. Постепенно менялся облик двигателя: в отличие от ГТУ-3 двигателя Э3080 и Э3081 выполнялись уже по реактивной схеме с современным лётным вариантом.

Несмотря на значительные успехи в создании первого в мире высокотемпературного турбовинтового двигателя (ТВД), в 1949 г. дальнейшие работы по двигателю были прекращены. В качестве одной из причин, в известной степени, была **преждевременность ТВД. Для ударной авиации требовался сверхзвуковой самолёт, реализуемый с турбореактивным двигателем (ТРД), а турбовинтовой – двигатель дозвуковой авиации.** Вероятно, возник и определённый дефицит производственных мощностей, требуемой для производства ТРД. Возвращение к турбовинтовым двигателям состоится, однако несколько позже, когда заказчиками выступят военно-транспортная и гражданская авиация. Но это случится уже без В.В. Уварова, который сосредоточится на работе в МВТУ, возглавив кафедру “Воздушно-реактивные двигатели” на созданном в 1948 г. факультете реактивной техники.

О роли В.В. Уварова в создании первого отечественного ТРД

Первый отечественный турбореактивный двигатель ТР-1 (рис. 3) был создан Архипом Михайловичем Люлькой. В своих расчётах он опирался на работы по воздушно-реактивному двигателю (ВРД) профессора Б.С. Стечкина, опубликованные в 1929 г. В 1930-х гг., будучи преподавателем в Харьковском авиационном

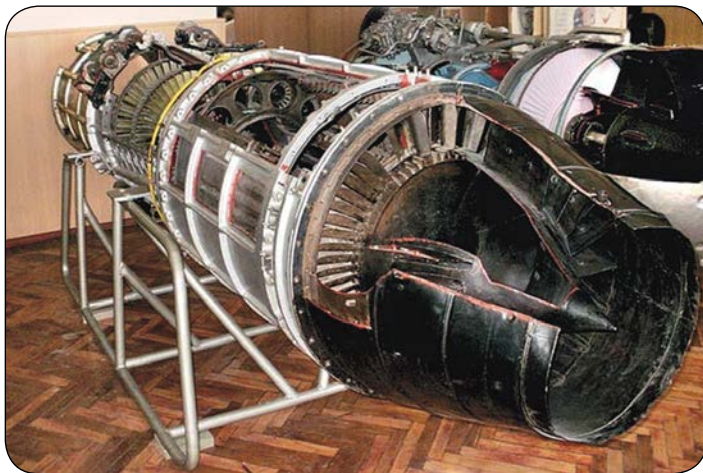


Рис. 3.
Турбореактивный двигатель ТР-1

институте (ХАИ), с группой энтузиастов А.М. Люлька начал работать над проектом ТРД. Учёный совет ХАИ, заслушав доклад А.М. Люльки, рекомендовал ему обратиться с полученными материалами в Москву, в Комитет по изобретениям, который через Главное управление авиационной промышленности направил его материалы в МВТУ на заключение Владимиру Васильевичу Уварову.

Владимир Васильевич умел смотреть далеко вперёд, анализировать, просчитывать, видеть перспективу, постоянно искать и находить новые научные и технические решения, с неуёмной энергией их отстаивать на любых уровнях, невзирая на авторитеты. И вот в 1938 г. ему как уже авторитетному газотурбинисту и “жёсткому” оппоненту после ряда отрицательных заключений учёных-теоретиков, главных конструкторов и других специалистов на дополнительную экспертизу направляют блуждавший более полутора лет по бюрократическим коридорам проект необычного (в то время ещё мало известного) турбореактивного двигателя (по существу конкурирующий проект).

Уваров бегло просмотрел толстенный трактат Люльки, потом вызвал своего заместителя Михаила Ивановича Вострикова.

– Разберись, пожалуйста, тут какая-то ерунда написана.

Подчинённые, несмотря на молодость Уварова, относились к нему с огромным уважением и, как правило, всегда с ним соглашались. Каково же было удивление Уварова, когда через две недели М.И. Востриков в большом смущении доложил, что “ерунды” в проекте не обнаружил!

После тщательного анализа термодинамики, газодинамики, конструкции, режимных параметров двигателя В.В. Уваровым был подписан развёрнутый положительный отзыв, открывший “зелёный свет” первому отечественному турбореактивному двигателю ТР-1. Вот как сам Владимир Васильевич Уваров вспоминал об этом времени:

«Конечно, моё самолюбие было уязвлено, и я предложил Михаилу Ивановичу проработать проект вместе. Целых полторы недели мы сидели вдвоём над “трактатом” Люльки, и я сумел перешагнуть через сложившееся “своё” мнение и по достоинству оценить присланный на отзыв проект. Тогда мною был написан, пожалуй, самый положительный отзыв за всю мою жизнь. Самой интересной особенностью проекта являлось теоретически обоснованное применение относительно низких температур (700 °С) на рабочих лопатках турбины. Это было в авиационном турбостроении того времени весьма смелым подходом к проблеме применения газовой турбины в авиации»¹¹.

Научный подвиг профессора В.В. Уварова

В связи с закрытием работ по ТВД В.В. Уваров сосредоточится на работе в МВТУ, возглавив кафедру “Воздуш-

но-реактивные двигатели” на созданном в 1948 г. факультете реактивной техники.

Результатом подвижнического труда Владимира Васильевича стало:

– утверждение газотурбинного двигателя в отечественной авиации;

– создание теории расчёта и проектирования газотурбинных двигателей, обобщённых в монографии В.В. Уварова “Газовые турбины, часть 1”, 1935 г., ставшей на многие годы первым отечественным учебником по газотурбинным двигателям, принёсшим В.В. Уварову мировую известность;

– подготовлена первая когорта высококвалифицированных газотурбинистов, дальнейший труд которых способствовал быстрому развитию отрасли;

– многочисленные научные труды В.В. Уварова и его учеников, в том числе по системам охлаждения газовых турбин, в значительной степени создали основы фундамента современного авиационного, транспортного и стационарного газотурбостроения.

В предисловии к монографии “Газовые турбины” им было отмечено: “Проблема газовой турбины поставлена давно, но решения не получила ещё до сих пор; автор глубоко уверен, что решить эту проблему можно лишь привлечением к ней нашей технической молодёжи и в первую очередь – слушателей ВТУЗов¹²”. Этот постулат был положен в основу учебной и научной работы новой кафедры. Первыми акциями стало установление связей с НИИ и промышленными отраслями, для которых газотурбинный двигатель мог бы быть полезен. В 1954 г. в Центральном лектории общества “Знание” (Политехнический музей) В.В. Уваров выступил с публичной лекцией “Газовые турбины”, вызвавшей большой общественный резонанс. Стенограмма лекции (тираж 55 000 экз.) почти мгновенно стала библиографической

¹¹ Л.М. Кузьмина. Огненное сердце. Московский рабочий. 1988. 208 с.

¹² ВТУЗ – высшее техническое учебное заведение.

редкостью. В лекции было представлено видение генерального пути развития газотурбинных двигателей и газотурбинных установок:

- повышение температуры газа перед турбиной и создание эффективных систем охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин;

- совершенствование термодинамического цикла, оптимизация параметров, переход от простого цикла к более сложным (по Зотикову – с промежуточным охлаждением, промежуточным сгоранием, высокой степенью регенерации),

- замещение паровоза более эффективным газотурбинным локомотивом (в то время – на угле, являвшимся основным топливом железнодорожного транспорта и теплоэнергетики);

- использование газотурбинного двигателя в других видах транспорта;

- полезность газотурбинной установки замкнутого цикла и перспективы её использования.

Особое внимание было сконцентрировано на крупной энергетике. В лекции было отмечено: "...большинство газотурбинных установок имеет мощность до 10 тыс. кВт. Возможность создания газовых турбин мощностью порядка 100–200 тыс. кВт даже некоторыми специалистами ставится под сомнение. Однако эти сомнения ни в какой мере не отражают действительного положения дел. Крупные турбины могут и будут строиться, но для этого необходимо ещё много потрудиться учёным и инженерам".

Газотурбовоз

Вектор научных работ кафедры был направлен на решение наиболее важных проблем, стоящих перед народным хозяйством. Первой из них стало замещение низкоэффективного паровоза (КПД ниже 8%) более эффективным газотурбинным локомотивом – газотурбовозом, что в масштабах страны могло привести



Киев. 1956 г.
Участники конференции по газовым турбинам у Владимирского кафедрального собора. Справа налево: Владимир Васильевич Уваров, Алексей Петрович Чернобровкин и Вадим Леонидович Иванов

к огромному экономическому эффекту (следует заметить, что идея создания газотурбинного локомотива впервые В.В. Уваровым была озвучена в 1926 г. на собрании теплотехников МВТУ). По согласованию и при поддержке харьковского предприятия транспортного машиностроения в 1952–1954 гг. на кафедре был разработан эскизный проект ГТД на пылеугольном топливе и его компоновка в вагоне локомотива. Были разработаны и испытаны ключевые агрегаты:

пылеугольная камера сгорания вихревого типа, оригинальный турбоциклонный агрегат очистки высокотемпературных продуктов сгорания от эрозионно-опасных зольно-угольных взвесей (защита лопаток турбины от эрозии) и др. Результаты работы были доложены в 1954 г. на IV сессии Отделения технических наук¹³ АН СССР, посвящённой газовым турбинам, а также вошли в первый сборник научных трудов кафедры¹⁴.

Когда в 1955 г. со стапелей Коломенского тепловозостроительного завода сошёл последний паровоз и век отечественных паровозов был закончен, работы кафедры по газотурбовозу оказались востребованы. Большую роль при этом сыграл высокий авторитет В.В. Уварова в промышленных кругах. С предложением о совместных работах по созданию первого отечественного газотурбовоза к нему обратился Главный конструктор одних из лучших в мире паровозов Лев Сергеевич Лебедевский. Решением правительства его КБ поручалось создание первого отечественного газотурбовоза на жидком топливе мощностью 2200 кВт в одновагонном исполнении. Отечественным железным дорогам с громадной сетью неэлектрифицированных участков требовался мощный автономный локомотив в одновагонном исполнении. В.В. Уваров, выдвигая и отстаивая идею газотурбовоза, обращал особое внимание на предельно допустимую нагрузку колёсной пары на рельс (нагрузка на ось), являющейся ограничивающим показателем массы локомотива (соответственно, допустимой массы двигательной установки). В железнодорожном транспорте сложилась ситуация,

похожая на военную авиацию 1930-х годов: требовался двигатель большой мощности (7000–10000 кВт) с малой удельной массой. Следовательно, это мог быть только ГТД.

Технический проект ГТД был разработан в МВТУ, а дальнейшее проектирование осуществлялось в КБ завода. В совместном конструкторском бюро штатные преподаватели и научный персонал кафедры выполняли роль научных консультантов и соруководителей тематических бригад. В ходе совместной работы и специальных лекций происходил процесс повышения газотурбинной квалификации бывших паровозников. Основная концепция ГТД, разработанная В.В. Уваровым, была поддержана Л.С. Лебедевским. Использование опыта кафедры по созданию авиационных двигателей оказалось весьма плодотворным, поскольку авиационная и стационарная турбостроительные промышленности в то время были разобщены. Например, это позволило свести время пуска двигателя до нескольких минут в отличие от весьма длительного, характерного для стационарных ГТУ. **По мнению Л.С. Лебедевского, важнейшей задачей первого отечественного газотурбовоза было показать его полезность, надёжность и эффективность в эксплуатации.** Газотурбовоз с более мощным и более совершенным ГТД – это будет следующее поколение, комплекс совместных НИР по которым развернутся почти одновременно.

С 1959 г. три коломенских газотурбовоза, приписанные к депо Льгов, успешно несли регулярную службу. Газотурбинный двигатель по сравнению с дизелем оказался более лёгким в управлении и обслуживании, шум в кабине машины не превышал 80 дБ (в дизельном тепловозе это – 96 дБ). По оценке ЦНИИ МПС эксплуатационные издержки (в рублях на 10^4 т · км) газотурбовоза и тепловоза ТЭ-3 с более экономичным дизелем

¹³ Отделение технических наук в составе Академии наук СССР было создано в декабре 1935 г. (Источник: Б.И. Иванов. Технические науки в Академии наук СССР в 30–60-е годы XX века. СОЦИОЛОГИЯ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. 2016. Том 7. № 1. С. 46).

¹⁴ "Вопросы газотурбостроения", ГНТИ машиностроительной литературы, М. 1955 г.



Рис. 4.
Газотурбовозы.

были практически одинаковы (0.3% в пользу газотурбовоза). Прибывший в 1974 г. в депо Льгов министр путей сообщения Б.П. Бещев с удивлением узнал, что газотурбовозы всё ещё успешно несут регулярную службу, и депо ими очень довольны. Он распорядился заказать в Коломне дополнительно ещё несколько газотурбовозов. Однако (по неозвученным причинам) производство газотурбовозов было закрыто ещё в 1963 г., а Главный конструктор Л.С. Лебедянский, не выдержав такого удара, скончался.

В.В. Уваровым, его учениками, сторонниками и продолжателями дела Л.С. Лебедянского многократно делались безрезультатные попытки реанимировать газотурбовоз, так нужный для железных дорог СССР, а ныне России. Время шло и, наконец, пришло. В 2013 г. Правительством РФ совместно с руководством железных дорог принят комплексный план мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива. Одним из основных звеньев



“технологической цепочки” от завода сжижения природного газа на месторождении до потребителя становится транспортная артерия – большегрузные составы (100–120 цистерн со сжиженным природным газом), ведомые мощным автономным локомотивом, работающим на том же топливе. Этим требованиям, как известно, мог отвечать газотурбовоз в одновагонном исполнении мощностью $8000 \div 9000$ кВт. Газотурбовоз с двигателем НК-361 на сжиженном природном газе мощностью 8500 кВт (совместный проект ОАО “Кузнецов”, Воронежский ремонтный завод, НИИ тепловозов) был создан к 2012 г. Первые два газотурбовоза

за (ГТ1h-001 и ГТ1h-002) с 2013 г. успешно проходят опытную эксплуатацию на Свердловской ж.д. (рис. 4), перевоза составы массой до 9000 т. Согласно подписанным договорам установочная партия газотурбовозов, подлежащая ежегодному пополнению к 2025 г., составит 24 газотурбовоза. А полный заказ составляет 40 локомотивов. *Предвидения В.В. Уварова, его научный и инженерный талант, вклад его учеников и сподвижников в создание отечественного газотурбовоза оправдались.*

Вклад в энергетику и не только

Круг научных и инженерных интересов В.В. Уварова был огромен. Он ежедневно не просто просматривал, а внимательно анализировал (с логарифмической линейкой в руках) все доступные отечественные и иностранные научно-технические публикации по широкому кругу энергетических проблем, особенно где он видел значимую роль газовых турбин. Одной из них, озвученной в публичной лекции 1954 г., была высокоэкономичная газотурбинная установки большой мощности, способная составить конкуренцию конденсационным паротурбинным установкам электростанций. В условиях ограничения максимального уровня температуры газа перед турбиной естественным решением является ГТУ большой мощности по многоагрегатному регенеративному (с высокой степенью регенерации) циклу Г.И. Зотикова¹⁵, дающему наибольшее приближение к циклу Карно.

Однако опыт создания и эксплуатации отечественных и иностранных реге-

неративных ГТУ крупной мощности свидетельствовал: регенератор является не только одним из наиболее массоёмких, но и наименее надёжных агрегатов ГТУ. В.В. Уваровым в качестве альтернативы впервые в мире была рассмотрена возможность создания мощной высокоэкономичной безрегенеративной установки, выполненной по предложенному им своеобразному изотермо-адиабатному циклу¹⁶. Такая схема ГТУ базируется на хорошо освоенных агрегатах (возможность практической реализации) и характеризуется высоким приближением к циклу Карно (карнотизация по Уварову). Это безрегенеративная ГТУ с многокаскадным процессом сжатия при промежуточном охлаждении, многокаскадным процессом расширения с промежуточными камерами сгорания. Особенностью предложенного цикла являются резко увеличенная степень повышения давления в последнем каскаде сжатия и резко увеличенная степень расширения на последнем каскаде расширения.

В последующих работах¹⁷ подробно, с примерами расчёта излагается метод анализа и оптимизация параметров изотермоадиабатного цикла. Этими и другими работами **впервые в мире теоретически и конструктивно было доказано, что карнотизация цикла ГТУ открывает пути к созданию экономичных газотурбинных установок мощностью 300–400 МВт и выше при практически приемлемых температурах перед турбиной.**

Как и с первыми разработками авиационного ГТД 1930-х гг., требовалось ещё много инициативы и энергии, что-

¹⁶ К вопросу о развитии газотурбостроения в СССР. Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 1958. № 1. С. 69–77.

¹⁷ Уваров В.В. Возможные пути развития газотурбостроения в СССР, Ивуз Машиностроение № 2, 1960 г.; Уваров В.В., Чернобровкин А.П. Газовые турбины, МашГИЗ, 1960 г.

бы убедить энергетиков в полезности мощной, эффективной газотурбинной установки и реальной возможности её создания. На одной из встреч со студентами 1970-х гг. Владимир Васильевич говорил: *“ГТД...это двигатель огромных возможностей, ярких перспектив. Но, изучая его, сталкиваешься с таинственными трудностями: научными, конструктивными, технологическими и, не удивляйтесь, – психологическими. Да-да, именно психологическими. Когда 12 лет назад наша кафедра выступила с заявлением, что газовая турбина – не двигатель малой и средней мощности, что можно создать газовую турбину мощностью в сотни мегаватт, то нас вежливо называли чудаками... Вот такие психологические трудности иногда тяжелее всех других”*. И В.В. Уваров упорно преодолевал эти трудности, никогда не опускал руки.

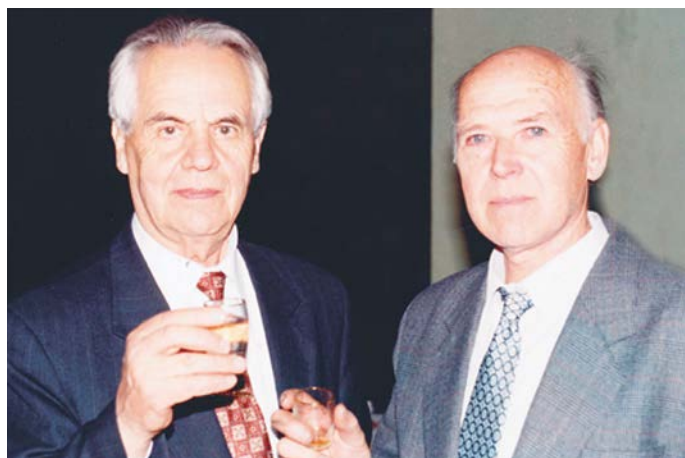
06.01.1959 г. в газете “Правда” была опубликована подготовленная кафедрой статья “Газовую турбину – в народное хозяйство”, а также более технически насыщенная журнальная “К созданию газотурбинных установок большой мощности”¹⁸. Публикации вызвали отклик, в том числе в иностранных технических журналах. Результатом публикаций стало решение правительства о разработке Харьковским турбогенераторным заводом им. С.М. Кирова (ХТГЗ) технического проекта газотурбинной установки мощностью 200 МВт (по схеме МВТУ). В результате совместной работы 1962–1966 гг. на ХТГЗ были выполнены эскизный и технический проекты газотурбинной установки ГТУ-200-750 номинальной мощностью 200 МВт с температурой газа перед турбинами 1023 К по многоагрегатной схеме изотермо-адиабатного цикла В.В. Уварова. По завершении эскизного проекта в МВТУ состоялось его публичное обсуждение с привлечением главных конструкторов стационар-

ных и авиационных турбостроительных предприятий, представителей отраслевых НИИ и КБ страны. Критические замечания и полезные советы были учтены в техническом проекте.

В результате расчётно-конструкторской проработки газотурбинной установки в двухвальном исполнении удалось получить достаточно простые, подкреплённые действующими технологиями конструктивные решения. При расходе воздуха на входе в компрессор низкого давления 453 кг/с были получены: расчётная электрическая мощность 191867 кВт, КПД 39.87%, удельная масса установки не выше 3.7 кг/кВт. При увеличении температуры перед турбинами на 22 К мощность установки повышается до проектного уровня. Институтом Теплоэнергопроект был разработан проект газотурбинной станции ГРЭС-1200 МВт с шестью установками ГТ-200–750. Технико-экономические расчёты ТЭП показали, что стоимость газотурбинной станции с агрегатами ГТ-200-750 на 20–25 млн руб. дешевле аналогичной с паротурбинными блоками К-200-130. Преимуществом ГТ-200-750 является простая компоновка в парогазовый блок с любой паротурбинной установкой (замещением регенеративного подогрева питательной воды теплотой от промежуточных воздухоохладителей и водонагревателя на выхлопе ГТУ). При температуре газа перед турбинами 1023 К, не требующей охлаждения лопаточных аппаратов турбины и расхода дефицитных высокотемпературных материалов, КПД ГТ-200–750 сопоставим с КПД ГТУ простого цикла с температурой газа перед турбиной 1700–1800 К. В перспективе при увеличении температуры газа перед турбинами до 1473 К КПД ГТУ-200-750 возрастет до 52%, а мощность при неизменном расходе воздуха на входе в компрессор низкого давления примерно удваивается.

Несмотря на преимущественные показатели ГТУ-200-750 по сравнению с ГТУ

¹⁸ Теплоэнергетика № 10, 1959 г.



**Александр Иванович Леонтьев
и Вадим Леонидович Иванов**

простого цикла, Министерство тяжёлого машиностроения от завершения работ “в металле” отказалось. Однако сам технический проект ГТУ-200-750, теоретические и практические разработки Владимира Васильевича 1958–1966 гг., доклад о ГТУ больших мощностей на ежегодной конференции ASME в 1969 г., другие выступления и публикации пробили “броню” неприятия ГТУ большой мощности. В ЦКТИ для ГТУ большой мощности был разработан осевой компрессор производительностью выше 600 кг/с при $n = 3000$ об/мин, на ХТГЗ построена самая мощная по тем временам в мире пятидесятимегаваттная газовая турбина ГТ-50-800 с трёхкаскадным компрессором и промощением между каскадами компрессора, двухкаскадной турбиной с промежуточным сгоранием и регенератором. Несколько позднее ЛМЗ разрабатывает варианты проектов стомегаваттной ГТУ. Один из них, регенеративный, поступивший на отзыв к В.В. Уварову, был подвергнут детальному анализу. К отзыву были приложены соображения о целесообразности рассмотрения альтернативного варианта на основе изотермоадиабатного цикла,

в котором регенератор замещается дополнительной камерой промежуточного сгорания и дополнительным промежуточным воздухоохладителем.

При равных КПД безрегенеративный вариант характеризовался существенно меньшей удельной массой и отсутствием наиболее уязвимого агрегата – регенератора. Не берёмся судить о влиянии мнения В.В. Уварова, на решение ЛМЗ, но в реали-

зованном варианте ГТ-100-750 заводом был принят безрегенеративный, карно-тизированный цикл с увеличенной степенью повышения давления на втором каскаде сжатия, одним промежуточным охлаждением при сжатии и одним промежуточным сгоранием при расширении.

Во второй половине 1960-х гг. появляются и зарубежные публикации, в которых (без термина “карнотизация” и ссылки на В.В. Уварова) признаётся целесообразность такого цикла. Например, газотурбинная установка AGTJ-100AB, разработанная в рамках японской национальной программы “Лунный свет”, практически полностью воспроизводит термодинамическую схему, реализованную в газотурбинной установке ГТ-100-750 ЛМЗ. **Время свидетельствовало – научные прогнозы В.В. Уварова (в том числе благодаря его личному огромному вкладу) сбывались: энергетические ГТУ мощностью 370–400 МВт вышли на мировой рынок, стали основным типом ГТУ для современных парогазовых установок.**

В сферу научных интересов В.В. Уварова вошли **атомная энергетика и космос**. В открытой в 1968 г. при кафедре Проблемной лаборатории кроме многолетних исследований ГТУ больших мощностей, систем охлаждения и тепловой защиты высокотемпературных узлов

энергоустановок начались исследования замкнутых газотурбинных установок для космоса; в лаборатории начала действовать первая в стране замкнутая газотурбинная установка (ЗГТУ) с внешним нагревателем, работающая на специально подобранных газообразных рабочих телах, исследовались накопители энергии применительно к работе ЗГТУ на орбите Земли при прохождении неосвещённого участка траектории. В 1970 г. Владимир Васильевич инициировал начало многолетней совместной работы с ОКБ им. Африкантова по ЗГТУ с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР) тепловой мощностью 600 МВт.

Принципиальные жизненные позиции в науке совмещались с большим гражданским мужеством. Известен такой факт. Когда на общем собрании ВТИ

осуждали деятельность директора ВТИ профессора Л.К. Рамзина как “врага народа”, В.В. Уваров попросил конкретизировать состав преступления директора. Не получив убедительных разъяснений, он единственный при голосовании воздержался, хотя это могло иметь для него печальные последствия.

Характеризуя титанический труд В.В. Уварова, его вклад в развитие газовых турбин, председатель комиссии по ГТУ АН СССР академик Борис Сергеевич Стечкин сказал так: **“Владимира Васильевича не увенчали государственными премиями и академическими званиями, но все мы высоко ценим его труды, его необыкновенную эрудицию, энтузиазм и бескомпромиссность. Только такие люди достигают действительно новых результатов в науке и технике”**.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Журнал “Энергия: экономика, техника, экология” публикует статьи по темам: энергетическая политика и безопасность стран и регионов, нефти и газодобыча, энергопроизводство и его экологические последствия, энергосберегающие технологии, прошлое, настоящее и будущее атомной энергетики, перспективы развития местных и возобновляемых гелио-, ветро- и гидроресурсов, водородная энергетика и т.д.

Передавая в редакцию свою рукопись, автор принимает на себя обязательство не публиковать её ни полностью, ни частично, ни в каком другом издании без согласия редакции. К рассмотрению принимаются рукописи объемом не более одного авторского лис-

та в одном экземпляре, напечатанные в электронной версии формата Word for Windows (размер шрифта – 14, междустрочный интервал – 1,5). К статье прилагается справка об авторе с указанием фамилии, имени, отчества, точного названия места работы, учёной степени, учёного звания, номера телефона, адреса электронной почты.

Рукописи не возвращаются.

Журнал индексируется в РИНЦ.

Автор обязан указать источник всех приводимых в тексте цитат, фактов и иной информации. Ссылки на источники оформляются постранично и нумеруются в порядке следования. Все аббревиатуры должны быть пояснены.

Льготную подписку можно оформить в редакции.