

ИНЖЕНЕР- МЕХАНИК

№ 2 (47)
апрель – июнь
2010

Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал
Издается с июля 1998 года
Выходит один раз в три месяца

Учредитель — Белорусское общество инженеров-механиков

Главный редактор академик С.А. Астапчик

Редакционная коллегия: М.С. Высоцкий, М.А. Андреев, В.Н. Дашков, А.М. Захарик, А.Б. Зуев, В.Л. Колпашиков, Л.Н. Крупец, Д.И. Корольков, Г.С. Лягушев, Е.И. Медвецкий, М.Г. Мелешко, С.А. Чижик

Адрес редакции:

220141, Минск, ул. Купревича, 10 (ранее Жодинская, 4)

тел./ факс 203-88-80; 226-73-36

E-mail: mail@boim.by

Свидетельство о регистрации № 1132 от 21.04.1998

Подписной индекс 00139

Компьютерная верстка Н.В. Райченко

Подписано в печать 16.06.2010.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 3,9.

Тираж 300 экз. Заказ №

Цена номера договорная.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ГНУ «Физико-техническом институте НАН Беларуси».

Лицензия ЛП № 02330/0494176 от 3.04.2009 г.

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Выдающиеся ученые СССР и Беларуси

Эолова арфа, самолеты и мосты (*Мстислав Всеволодович Келдыш*).....2

Академик Николай Сергеевич Акулов.....6

Выдающийся белорусский физик, историк-научковед и методист (*К 100-летию со дня рождения М.А. Ельяшевича*).....10

Сыновья об отце (*Александр Семенович Махнач*).....13

Разработки ученых и специалистов

Новый подход к объемно-поверхностной закалке тяжело нагруженных зубчатых деталей мобильных машин.....21

Высокопроизводительная технология механической обработки ведомой шестерни заднего моста автомобилей семейства МАЗ.....32

Знаменитые соотечественники

Знаменитые земляки в истории российского военно-морского флота.....37

Из истории авиации

Наш ответ Чемберлену, или Стратегическая авиация СССР.....40

Патентуем сами

Разработка новых ветровых агрегатов способных эффективно работать в континентальных регионах мира.....45

ЭОЛОВА АРФА, САМОЛЕТЫ И МОСТЫ

Поиски, сопровождающие развитие техники, всегда сопряжены с риском принятия неверных решений, приводящих к авариям, а иногда и к катастрофам. Без этого не обходится ни кораблестроение, ни конструирование автомобилей, ни энергетика. Не является исключением и авиация. Путь в небо вымощен обломками несметного числа летательных аппаратов и омрачен гибелью их отважных испытателей. Но даже на этом тернистом пути встречаются явления, совершенно непредсказуемые. Так, в 1930-х гг. по миру прокатилась волна странных аварий при испытаниях скоростных самолетов. По воспоминаниям Героя Советского Союза, заслуженного летчика-испытателя Марка Лазаревича Галлая, очевидцы наблюдали почти одну и ту же картину: самолет летел нормально, как вдруг какая-то неведомая сила, будто взрывом, разрушала машину. Однако никаких следов взрыва — копоти — на упавших обломках не оказывалось. Пилоты, которым посчастливилось выжить, говорили о появлении перед катастрофой интенсивных вибраций нарастающей амплитуды. Таинственное и грозное явление назвали «флаттер» (от английского flutter — дрожание).

Современная авиация — это техника больших скоростей. Даже обычные пассажирские самолеты летают очень быстро, лопасти вертолетных винтов при вращении достигают почти скорости звука, военные самолеты и ракеты движутся в несколько раз быстрее звука. И тем не менее вся эта техника не только остается целой, но и эксплуатируется многие годы. О том, как и почему возникает флаттер и как ученые и инженеры научились его побеждать, рассказывает эта статья.

*Кандидат технических наук **Светлана КУЗЬМИНА**,
доцент, кандидат технических наук **Петр КАРКЛЭ***



Мстислав Всеволодович Келдыш (1911–1978) — выдающийся советский ученый в области математики и механики. После окончания в 1931 г. Московского университета работал в ЦАГИ. Внес решающий вклад в решение проблем флаттера. После Второй мировой войны его главной целью стали полеты в космос. С середины 1950-х гг. он разрабатывал теоретические предпосылки вывода искусственных тел на околоземные орбиты, а в дальнейшем — полетов к Луне и планетам Солнечной системы. М.В. Келдыш руководил научно-техническим советом, координировавшим деятельность по созданию первого искусственного спутника Земли. Ему принадлежит решающая заслуга в осуществлении программ пилотируемых полетов, проведении исследований околоземного космического пространства, межпланетной среды, Луны и планет. Более 10 лет он руководил Академией наук СССР.

АЭРОУПРУГОСТЬ. ДРЕВНОСТЬ И СОВРЕМЕННОСТЬ

Известно, что в Германии с 1935 по 1943 г. произошло около 150 авиационных аварий и катастроф, причиной которых оказался флаттер. В США за период 1940–1950-х гг. было более 100 подобных летных происшествий. Советские авиаторы тоже понесли такого рода потери, но данные об этом сразу засекречивали.

Когда исследователи выяснили природу флаттера, оказалось, что люди знакомы с ним с незапамятных времен. В основе флаттера лежит аэроупругость — область механики, в которой изучаются явления, обусловленные взаимодействием упругих тел и обтекающего их потока газа или жидкости. Согласно легендам, царь Давид на ночь вешал над своей кроватью арфу, и она издавала звуки под действием полночного бриза. Давно известен музыкальный инструмент под названием эолова арфа (в честь древнегреческого бога ветра). Он представляет собой ящик-резонатор с натянутыми над ним струнами. От движения струи воздуха струны вибрируют, создавая аккорды необычного, нежного тембра.

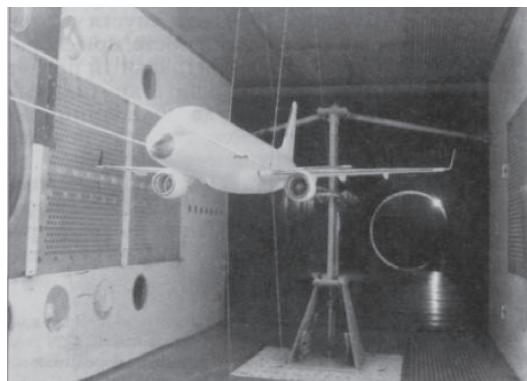
КЛАССИЧЕСКИЙ ФЛАТТЕР

За решение проблем флаттера сразу же взялись лучшие ученые. Довольно быстро разобрались, что флаттер порождается взаимодействием в конструкции упругих, инерционных и аэродинамических сил. В крыле, например, центр масс не совпадает с центром жесткости, т. е. точкой, воздействие силы на которую вызывает чистый изгиб (без кручения). При полете встречный поток воздуха стремится изогнуть крыло вверх, но упругие силы противятся этому. Сила же инерции, приложенная к центру масс, создает момент, закручивающий крыло. В результате меняется угол атаки и крыло начинает двигаться в обратном направлении, но с добавочной энергией, полученной от воздушного потока. Возникает положительная обратная связь, и энергия из потока «закачивается» в конструкцию. Здесь можно провести аналогию с электроникой, где в колебательном контуре, подпитываемом источником питания, можно возбудить незатухающие колебания: инерция играет роль индуктивности, жесткость — емкости. Воздушный поток обладает практически неограниченной энергией, поэтому амплитуда колебаний крыла растет, пока не произойдет его разрушение. Этот вид флаттера получил название «классический».

Качественная картина стала достаточно ясной, и удалось составить основные уравнения. Но они

оказались столь сложными, что решить их аналитически не удавалось.

Академик С.А. Чаплыгин — в 1930-х гг. научный руководитель ЦАГИ — понимал, насколько трудна задача об опасных вибрациях самолета в полете. Он поручил только что поступившему в институт молодому талантливому специалисту М.В. Келдышу прорецензировать работы по вибрациям. Келдыш ввел упрощающие расчет допущения и использовал поправочные коэффициенты, полученные экспериментальным путем на моделях. Своими работами ученый на годы вперед определил, как нужно решать на практике задачи защиты от флаттера. В 1942 г. он был награжден Сталинской премией. В 1946 году М.В. Келдыша избрали действительным членом Академии наук, а впоследствии — ее президентом.



Для исследования флаттера и его влияния на летательные аппараты в ЦАГИ изготавливают динамически подобные модели для испытаний в аэродинамических трубах. Эти модели на порядок сложнее обычных уменьшенных копий самолетов, зато их создание исключает риск гибели пилотов



Так выглядит фрагмент динамически подобной модели самолета после испытаний на флаттер в аэродинамической трубе. Если бы подобное произошло в реальном полете, самолет неизбежно разрушился бы и погиб

В распоряжении специалистов тогда не было мощной вычислительной техники, и получить точные расчетные результаты не удавалось. Основное внимание уделялось исследованиям флаттера на моделях. Обычные геометрически подобные (масштабные) модели для этого не годились, т. к. в них не удавалось получить распределение масс и жесткостей, как на реальном самолете. Для испытаний в аэродинамических трубах изготавливали динамически подобные модели. Они были очень сложными и дорогими, но зато их поведение точно соответствовало поведению самолета. В трубе можно экспериментально определить, при какой скорости полета произойдет флаттер, с какой частотой будут происходить колебания и на каких частях самолета возникнут колебания с наибольшими амплитудами.

Умелое сочетание расчета и эксперимента уже в пятидесятые годы прошлого века позволило практически исключить случаи флаттера в полете. Неприятности случались только тогда, когда исследования по тем или иным причинам не проводились.

Кстати, совместить центр масс, центр жесткости и аэродинамический фокус — точку, где приложена равнодействующая аэродинамических сил, — удалось в лопастях вертолетных винтов, и они никогда не испытывают классического флаттера.

Когда этого сделать не удастся, стараются «разнести» собственные частоты элементов планера, органов управления, подвесных грузов, например двигателей на пилонах. Такие меры препятствуют развитию положительных обратных связей и повышают критическую скорость флаттера.

ВБЛИЗИ СКОРОСТИ ЗВУКА

По мере роста скоростей летательных аппаратов были обнаружены и другие механизмы потери устойчивости. На околозвуковых скоростях, например, на агрегатах самолета формируются так называемые скачки уплотнения. Обычно это происходит на верхней поверхности крыла, где поток разгоняется, а потом, ближе к задней кромке, замедляется (на задней кромке скорости потоков, стекающих с верхней и нижней поверхностей крыла, должны быть равны). Торможение происходит скачком, и в этом месте может произойти отрыв потока. В зоне отрыва возникают мощные пульсации давления, которые вызывают деформации конструкции. Положение скачка зависит от скорости — чем она больше, тем ближе скачок к передней кромке крыла, а также от деформации. Деформация в свою очередь зависит от положения скачка. Снова получается система с обратной связью, и при определенных усло-

виях могут появиться незатухающие колебания. Правда, в этом случае неограниченной «закачки» энергии не происходит: движение скачка ограничено размерами элемента планера — крыла, фюзеляжа, оперения. Колебания имеют конечную амплитуду и не всегда приводят к разрушению.

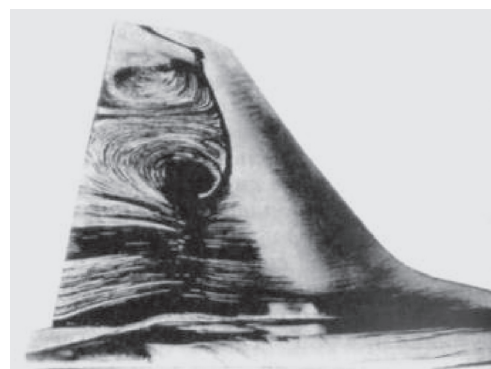
Похожие явления, называемые бафтингом (от английского buffet — бить, ударять), происходят и на дозвуковых скоростях при больших углах атаки. При бафтинге обтекание конструкции потоком перестает быть гладким, непрерывным. В результате возникают вибрации, вначале слабые, а с увеличением скорости или угла атаки все более сильные, вплоть до разрушающих.



При околозвуковой скорости полета поток воздуха, обтекающего верхнюю поверхность крыла резко замедляется и отрывается от крыла.

За точкой отрыва происходит скачок плотности, воздействующий на крыло и деформирующий его.

Положение скачка и деформация крыла взаимно влияют друг на друга, и могут появиться условия для возникновения незатухающих колебаний



При изучении бафтинга на моделях используют метод масляной пленки. Модель покрывают слоем вязкого масла. В аэродинамической трубе воздушные потоки, обтекающие модель, создают на масляной пленке рельеф, соответствующий движению струй. Благодаря высокой вязкости масла рельеф сохраняется некоторое время после остановки потока, и его можно фотографировать. Здесь изображена картина обтекания кия самолета с большим углом атаки. Черная полоса указывает место скачка плотности, за которым видны сильные завихрения

К сожалению, до настоящего времени не удалось создать приемлемый математический аппарат для решения этой задачи. Приходится довольствоваться экспериментами на моделях в аэродинамических трубах.

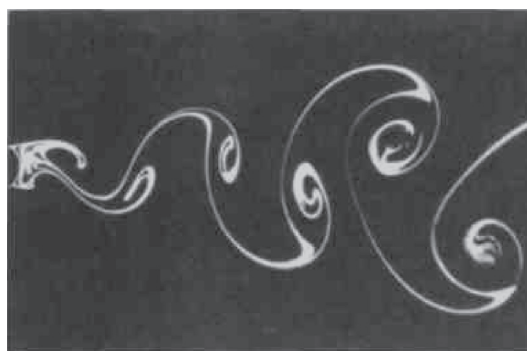
ДОРОЖКА КАРМАНА, ИЛИ ЧТО ПОГУБИЛО ТАКОМСКИЙ МОСТ

Плохое обтекание может привести еще к одному виду неустойчивости — срывному флаттеру. На самолетах он встречается редко, ведь при проектировании именно качеству обтекания уделяют максимальное внимание. Но если самолет попадает в условия обледенения, то поверхность крыла, в частности его передняя кромка, покрывается ледяной коркой произвольной формы. Характер обтекания резко ухудшается, и за крылом может формироваться периодическая система вихрей — дорожка Кармана (Теодор Карман (1881–1963), венгр по происхождению, получил образование в Германии. С 1929 г. жил и работал в США. Автор трудов по аэродинамике и механике деформируемого твердого тела), которая вызывает колебания крыла.

Для предотвращения срывного флаттера на самолетах устанавливают противообледенительные системы. А на проводах линий электропередач, на тросах Байтовых мостов таких систем нет, поэтому при определенной силе ветра могут возникнуть сильные колебания. Именно периодичность вихрей в дорожке Кармана создает условия для вибрации проводов и тросов. Если частота схода вихрей совпадает с собственной частотой конструкции, в ней, как в золотой арфе, возникают незатухающие колебания.

Считается, что разрушение моста через пролив Такома в США было обусловлено срывным флаттером. Этот мост представлял собой подвесную конструкцию с центральным пролетом длиной 853,5 м и шириной 11,9 м. Вертикальные колебания значительной амплитуды впервые были замечены еще при строительстве висячей проезжей части. В ноябре 1940 г., спустя четыре месяца после открытия моста, при скорости ветра 18,8 м/с центральный пролет внезапно стал совершать крутильные колебания. Амплитуда колебаний становилась все сильнее, и спустя полчаса произошло разрушение.

Когда мост восстанавливали, то учли полученный урок и провели всеобъемлющие исследования конструкции на аэроупругость. В результате вместо балок установили сквозные фермы, легко продуваемые потоком, и навсегда избавили сооружение от опасных колебаний.



При плохом обтекании за объектом (в данном случае круговым цилиндром) периодически сходят вихри, образуя так называемую дорожку Кармана. Если частота схода вихрей совпадает с собственной частотой объекта, возникают незатухающие колебания, или срывной флаттер



В 1940 г. в США из-за срывного флаттера разрушился мост через пролив Такома (отретушированное фото случайного очевидца)

ОПТИМАЛЬНУЮ КОНСТРУКЦИЮ ПОДБИРАЕТ КОМПЬЮТЕР

Несмотря на то, что задачи аэроупругости приходится решать во многих отраслях техники, ими занимались и занимаются в основном авиационные инженеры. Исследования в этой области начались в 20-х гг. прошлого столетия, но в настоящее время их интенсивность в связи с появлением мощных вычислительных машин резко возросла.

Современные компьютеры позволили реформировать сам процесс проектирования новых самолетов и ракет. Он становится междисциплинарным. Проектирование ведется с одновременным учетом противоречащих друг другу требований к прочности, защите от неблагоприятных последствий явлений динамической и статической аэроупругости, весовым характеристикам, аэродинамике, усталостной прочности.

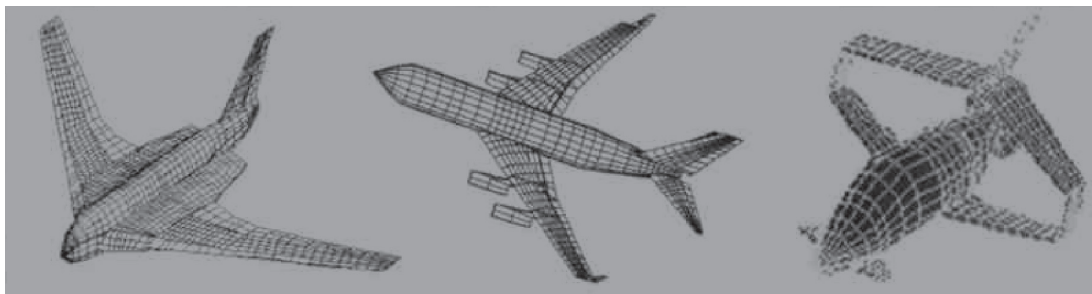
С этой целью создана и широко используется система многодисциплинарного проектирования самолетов «Аргон». В ней на основе разработанных в институте численных методов реализованы алгоритмы решения большинства необходимых в практике проектирования самолетов задач аэроупругости.

Качество расчетной схемы можно проверить и с помощью наземных частотных испытаний реального самолета. Обычно их проводят перед первым вылетом машины: с помощью специальных вибраторов, развивающих усилия до 500 кг, в конструкциях вызывают и регистрируют колебания разной формы с частотами от нуля до 80–100 Гц. В результате получают так называемый частотный паспорт конструкции. Информацию о резонансных частотах различных элементов сопоставляют с расчетными данными. Отличия не должны превышать

5%. Иногда после наземных частотных испытаний схему приходится корректировать.

Помимо описанных выше задач динамической аэроупругости в системе «Аргон» решаются некоторые проблемы статической аэроупругости. Она не связана с возникновением в конструкциях колебаний, но приводит к не менее печальным последствиям. Наглядным примером могут служить поваленные сильным порывом ветра деревья.

В авиации статическая аэроупругость проявляется, например, в так называемом реверсе органов управления. При отклонении органа управления поток воздуха вызывает силы, которые деформируют упругое крыло, и фактическая реакция летательного аппарата не совпадает с той, которая имела бы место при абсолютно жестком крыле. Если деформация окажется значительной, то результат может быть обратным ожидаемому.



Система «Аргон» позволяет проектировать летательные аппараты с учетом требований по прочности, ресурсу, аэродинамике, статической и динамической аэроупругости

АКАДЕМИК НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ АКУЛОВ

К столетию Николая Сергеевича Акулова Институтом прикладной физики НАН Беларуси была выпущена книга воспоминаний о нем, написанная, конечно же, для тех, кто его не знал. Но и те, кто знал его, писали, уверен, с удовольствием и благоговением перед большой личностью и выдающимся ученым. Жаль, что тогда не удалось собрать воспоминания хотя бы всех его учеников и тех, кто считали себя таковыми — многие уже ушли из жизни. А список защитивших под его руководством докторские диссертации на впервые в мире созданной им кафедре магнетизма в МГУ был бы впечатляющий: ака-

демики Л.В. Киренский и Р.Г. Аннаев, профессора В.В. Телеснин, К.П. Белов, Н.С. Брюхатов, Е.М. Кондорский, Г.С. Кринчик, Р.П. Дьяков, И.М. Пузей, М.В. Дегтяр, Н.И. Еремин. Мировая школа. Цвет науки о магнетизме. С каждым связаны открытия в этой области. Еще в 1932 г. (Акулову 32 года) нобелевский лауреат В. Гейзенберг писал в МГУ: «Уже проведенные господином Акуловым исследования очень способствовали разъяснению проблем ферромагнетизма и я надеюсь, что из этого направления работ может развиваться что-то выдающееся». И далее в 1973 г., приглашая Николая Сергеевича в Мюнхен, он

пишет: «Времена, когда мы вместе работали над проблемами магнитострикции, давно прошли, но я охотно их вспоминаю». Законченная теория магнитострикции изложена ими в двух основополагающих статьях.

С именами Н.С. Акулова связаны открытые им законы анизотропии (1928), закон магнитострикции как функции ориентации оси легкого намагничивания в кристалле (1931), теория кривой намагничивания и ее связь с напряжениями, теория четных эффектов, теория магнитного насыщения, теория магнитной вязкости (с В.В. Телесниным). В великолепно написанной монографии [Ферромагнетизм. — М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1939. — 188 с: черт., граф.] Акулов описал ферромагнетизм с единых представлений. На похоронах Н.С. Акулова его ученик профессор МГУ Г.С. Кринчик сказал: «Мир понимает магнетизм таким, каким его описал Акулов». Прошло 34 года со дня смерти Н.С. Акулова, но все, кто работают в магнетизме, знают, что достоверность этого высказывания не уменьшилась.

Как-то Николай Сергеевич пошутил, что ученый может создать что-либо значительное в своей области только в течение первых семи лет, а затем следует сменить научное увлечение. Хотя семилетний срок зависит от индивидуальности, но, по крайней мере, четыре раза в жизни он менял доминирующее направление работ, правда, с магнетизмом не расставался до конца. Вторым увлечением после магнетизма стали химическая динамика и теория цепных процессов, обобщенные в монографиях [Основы химической динамики / Моск. гос. ун-т. — М.: МГУ, 1940. — 95 с.; Теория цепных процессов. — М.; Л.: Гостехиздат, 1951. — 336 с.: черт.], (надо отметить, что все монографии написаны Акуловым без соавторов). Результатом стал открытый им закон кинетики цепных процессов. Параллельно и независимо работа в области цепных процессов велась под руководством будущего нобелевского лауреата академика Н. Семенова. Антагонизм этих двух школ привел в конечном итоге к недельной публичной научной дискуссии в МГУ (были же такие!) с переполненным актовым залом, жаркой полемикой и научной комиссией в составе академика А.И. Опарина профессоров А.А. Соколова, А.И. Тихонова и др., которая подтвердила значение обоих направлений. Вот одна из цитат заключения: «...Автогенетические функции Акулова оказались весьма ценными для отображения процессов взрывного типа и нашли широкое применение при расчетах кинетики взрывных процессов. Это дало возможность решить целый

ряд практически важных вопросов, возникающих при анализе процессов горения в двигателях внутреннего сгорания». Затем еще были теория дислокаций [Дислокации и пластичность. — Минск: АН БССР, 1961. — 107, [2] с.: черт. — Рец.: Орлов А.Н., Работнов Ю.Н. // Физика металлов и металловедение. — 1962. — Т. 14, № 3. — С. 452–455] и теория элементарных частиц: многие, видимо, помнят его публичную статейную полемику с академиком Ф.И. Федоровым. Работы по теориям дислокаций и элементарных частиц были выполнены уже в Минске, сначала в Физико-техническом Институте АН БССР (с 1959 г.), а затем в Отделе физики неразрушающего контроля АН БССР, который Акулов создал на базе лаборатории физических проблем ФТИ в 1963 г. (с 1980 г. Институт прикладной физики АН БССР).

Для Н.С. Акулова всегда было характерно умение схватить главное в проблеме. Мне кажется, он был чужд многоходовому анализу поставленной задачи и, часто интуитивно, что всегда является свидетельством глубокого знания предмета, формулировал основные принципы. Это было не всегда одинаково удачно, зато всегда было четко и недвусмысленно. По-видимому, именно четкие формулировки помогали ему решать проблемы. В качестве примера приведу его анализ кинетики дислокаций в пластичных кристаллах. Тысячи статей и десятки книг были написаны к тому времени, как Акулов взялся за исследование явления пластичности. Десятки механизмов, описывающих сложное и часто противоречивое поведение дислокаций в процессе деформации, были предложены и исследованы. Акулов отбросил второстепенное и рассмотрел поведение дислокаций как кинетический цепной процесс размножения и аннигиляции последних. К тому времени он уже написал книгу «Кинетика цепных реакций», и предмет был ему хорошо известен. Формула, открытая Акуловым для описания других эволюционных процессов, прекрасно описывала поведение дислокаций, по крупному выделяя главные черты явления: спонтанное зарождение, размножение дислокаций леса и аннигиляция. На эту формулу затем часто ссылались, иногда без упоминания автора, что свидетельствует о ее признании в качестве основополагающей. Думаю, что именно благодаря простоте и проникновению в суть явления, его трактовки и феноменологические формулы, описывающие явление, в дальнейшем обычно претерпевающие изменения в связи с уточнением механизмов, часто оказывались весьма долговечными.

Четкое формулирование Акуловым вопроса проявлялось и в повседневной жизни по

отношению к любым проблемам, которые он затрагивал, включая политику, быт или этические нормы. Это проявлялось в его высказываниях, которые он часто и к месту приводил. Ему удавалось часто в одной фразе выразить суть и содержание вопроса. Мы и по сей день часто вспоминаем его репризы, так называемые «акулизмы» типа «кусается — значит растет» (о молодых, не по возрасту ретивых его учениках, которые для своего роста были готовы на все) или «не знаешь, что сказать, скажи правду».

Для Акулова характерна важная мировоззренческая черта: понимание теории приходит тогда, когда вы можете реализовать ее на практике. Изобретательство и практическая реализация — составные части его деятельности; некоторые из них получили общее признание и названы в мировой литературе его именем: анизометр Акулова, магнитная металлография Акулова — Биттера, магнитный толщиномер Акулова и др. По этому поводу Акулов шутил: «Некоторые ученые занимаются только теорией и их периодически ругают за отсутствие практического выхода (тогда тоже за это ругали), другие, наоборот, занимаются практической реализацией и их периодически ругают за отсутствие фундаментальных результатов. А меня не зацепишь: когда ругают первых, я показываю железки, а когда вторых — формулы». Поэтому власти к нему по мелочам не приставали. Ему даже прощали беспартийность, хотя для зав. кафедрой МГУ и зав. отделом в АН БССР это было немислимо. Правда, по крупному ему доставалось, например, его вынужденный уход из МГУ в 1958 г. из-за большой ненаучной разборки с ректором МГУ академиком А. Петровским и вмешательством высших партийных органов СССР. Вообще разборки с сильными мира науки (например, в разное время с академиками П.Л. Капицей, Н.Н. Семеновым, Л.Д. Ландау) сопровождали Акулова по жизни и, с моей точки зрения, не принесли ему дополнительной славы. Вообще, по-моему, нацеленность на борьбу с кем-либо была неотъемлемой чертой характера и потребностью Н.С. Акулова.

О характере Николая Сергеевича следует сказать особо. О нем говорили с таким же осуждением, с каким восхищались его научными успехами. Его это никак не трогало и даже забавляло. По этому поводу он любил рассказывать притчу про Паганини. «Последний, — он говорил, — в детстве был ужасный ребенок, доведший отца до того, что тот изгнал его из дома. По жизни он не имел близких друзей, а церковь достал до того, что та не разрешила предать его тело земле и т. п. «И что же теперь?»», — говорил Акулов. — Все за-

были о его дурном характере, но помнят его бо-жественную музыку». Вообще, многие обычные оценки, распространенные на Акулова, не дают однозначного представления о нем. Но одно неопровержимо — это преданность истине, естественно, в его трактовке. Если он был в чем-то уверен, то переубедить его было не просто трудно, а невозможно. Притом, он всегда старался превратить свою «относительную» уверенность в «абсолютную», т. е. доказать всем абсолютную правильность своей оценки. Именно в этом причина его многочисленных открытых дискуссий, о части из которых уже упоминалось выше. Прискорбно, что для доказательства своей правоты он иногда использовал и запрещенные, на мой взгляд, приемы, к которым, например, относится его участие в борьбе с академическими «космополитами» в 1948 г. (Мандельштам, Папалекси, Ландау, Капица, Тамм) [Г. Горелик. Андрей Сахаров, Москва, Молодая гвардия, 2010 г.]. Он продолжал говорить об этом и позднее, и в семидесятые годы, когда уже нельзя было навредить этим людям. Поэтому у меня создалось впечатление, что это происходило от его абсолютной уверенности в своей правоте. Об этом говорит также и то, что свое несогласие с кем-то он выражал публично, не таясь.

Иногда эта уверенность касалась и самооценок качества своих работ и незаслуженно воспринималась, как хвастовство, не будучи таковым. Хотя и это Акулов с юмором не опровергал, если ему на это указывали. Так, однажды на конференции в Ленинграде на вопрос, по-моему, его оппонента профессора Ю. Орлова: «Николай Сергеевич, почему Вы хвастаетесь?» он мгновенно нашел нетривиальный ответ и со смехом сказал: «Просто потому, что у меня есть, чем хвастаться, а у Вас нечем». В свойственной ему манере он вызывал противника на словесный поединок, в котором ему не было равных. И все же надо сказать, что эта уверенность возникала у Акулова только, когда он глубоко разбирался в предмете. Во всех остальных случаях он становился примерным слушателем, каковым мы его часто видели.

Я думаю, что в основе Акуловского миропонимания лежал здравый смысл. Им он обладал в полной мере. Здравый смысл, помноженный на уверенность в себе и абсолютное пренебрежение к общепринятым точкам зрения, позволяли ему высказывать суждения в любых областях и быстро менять области интереса. Простота и оригинальность его идей была основана на этих трех китах. Однажды он привел свой афоризм, который, как мне кажется, очень хорошо соотносится с его образом мышления: «Если в результате сложных рассуждений получается результат, противоре-

чащий здравому смыслу, то предпочтение надо отдать последнему». Хотя эта точка зрения и не бесспорна, но следование ей иногда давало блестящие результаты. Одним из примеров являются две работы о магнитной проницаемости в пульсирующих магнитных полях, опубликованные в 1926 г. В них ясно с позиций классической физики излагались основные принципы магнитного резонанса как явления, основанного на прецессии спинов в магнитном поле, причем частота прецессии определялась величиной магнитного момента и величиной магнитной индукции. В дальнейшем все эти явления стали известны как сугубо квантовые магнито-резонансные явления (например, первое из известных явление ЭПР было открыто в 1939 г. Займовским), но начало этого процесса, как мне представляется, было положено Н.С. Акуловым, а оригиналы — незаслуженно забыты. Другой пример — профессор И.М. Пузей, один из его любимых учеников, как-то рассказывал мне о насмешливой реакции, которую произвела в Московском университете опубликованная формула Акулова, в которой магнитная проницаемость зависела в том числе от константы магнитострикции в десятой степени. И только лишь после публикации Тябликовым квантовой теории магнетизма, где была выведена именно эта зависимость, критики уважительно замолчали. Хотя Акулов хорошо знал квантовую физику (заведая кафедрой магнетизма, ее нельзя не знать), он тем не менее считал, что многие квантовые эффекты могут быть описаны из классических соображений, если следовать здравому смыслу.

Несколько вех из биографии Н.С. Акулова

В г. Орле, где в 1900 г. родился Николай Акулов, есть областной музей, а в нем есть экспозиция, посвященная Акулову. Среди представленных там личных вещей есть метрическое свидетельство, которое дает представление о происхождении будущего знаменитого ученого: «По Указу его императорского величества Орловская Духовная консистория сим свидетельствует, что в метрической книге Успенской церкви города Орла за тысяча девятисотый год в 1-й части о родившихся под № 73 мужского пола записан следующий акт: тысяча девятисотого года ноября тридцатого родился, а декабря третьего крещен Николай, его родители — Орловский мещанин Сергей Стефанов Акулов и его законная жена Анфиса Васильева, оба православные, восприемниками были дворянин Михаил Александров Корольков и жена Орловского купца Елена Алексеева Наумова. Таинство крещения совершал протоиерей Андрей Казанский с причтом».

В 1918 г. Акулов окончил Орловскую мужскую гимназию, выпускниками которой в разное время были художник Г.Г. Мясоедов, государственный деятель П.А. Столыпин писатель Н.С. Лесков, автор школьных учебников по математике А.П. Кисилев, деятель православной церкви митрополит Киевский и Галиции Флавиан (Н.Н. Городецкий). Все эти и многие другие имена, как и имя Николая Акулова вписаны в историю этого края России. С 1920 г. после добровольной службы в Красной Армии он целиком посвящает себя науке.

Н.С. Акулов окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1926 г. После окончания МГУ он стал работать в магнитной лаборатории под руководством В.К. Аркадьева, а в 1932 г. его избирают профессором и он организует на физическом факультете МГУ кафедру магнетизма, где он вплоть до 1954 г. подготовил блестящую плеяду ученых. Его первая статья без соавторов вышла в год окончания МГУ в 1926 г. и сразу была опубликована в «Журнале Русского физико-химического общества» (в дальнейшем ЖЭТФ). Одновременно с работами на кафедре магнетизма МГУ Н.С. Акулов руководил некоторыми работами в АН БССР, академиком которой он являлся с 1940 г. Многие его ученики в Беларуси давно доктора наук и руководят научными коллективами.

Рисуя портрет Акулова, нельзя обойти молчанием его многочисленные увлечения, которые в разные периоды его жизни почти целиком его поглощали. Рассказывают, что в конце тридцатых годов он настолько увлекся бильярдом, что местом, где его с наибольшей вероятностью могли найти многочисленные аспиранты из МГУ, был бильярдный зал гостиницы «Националы». То же самое происходило во времена его увлечения теннисом в пятидесятые годы. В Минске он отдавал свои предпочтения шахматам, о чем многие его партнеры с удовольствием вспоминают, и вокальным упражнениям с преподавателем музыки. Скончался он в 1976 г. в осеннем белорусском лесу, собирая грибы и напевая любимые арии. По его просьбе мы хоронили его вблизи его дачи на сельском подмосковном кладбище вблизи г. Звенигорода по соседству с могилой академика И.И. Артоболевского, с которым они долгое время дружили семьями. Его вдова Лидия Дмитриевна Акулова свято чтит память о своем знаменитом муже.

*Ученик Н.С. Акулова,
Заведующий лабораторией
вычислительной диагностики
ИПФ НАН Беларуси, докт. техн. наук
В.Л. Венгринович*

ВЫДАЮЩИЙСЯ БЕЛОРУССКИЙ ФИЗИК, ИСТОРИК-НАУКОВЕД И МЕТОДИСТ К 100-летию со дня рождения М.А. Ельяшевича

Э.М. Шпилевский

Михаил Александрович Ельяшевич начал работать в Беларуси, будучи уже маститым ученым. Доктор наук, соавтор двух монографий, за одну из которых присуждена Сталинская (Государственная) премия, один из разработчиков оптических методик и участник испытаний первого советского ядерного заряда. Работа в этом направлении высоко оценена правительством (за выполнение правительственных заданий его наградили в 1949 г. Орденом Ленина и вручили Сталинскую (Государственную) премию). М.А. Ельяшевич принимал участие в испытаниях ядерного, а затем термоядерного оружия. На Семипалатинском полигоне он создал оптическую лабораторию и был ее руководителем. В ноябре 1955 г. участвовал в испытании водородной бомбы мегатонной мощности.

В марте 1956 г. М.А. Ельяшевич был избран академиком АН БССР и начал работу в Институте физики и математики. Здесь он сначала возглавил созданную им лабораторию радиоспектроскопии, затем организовал лабораторию высокотемпературной оптики. Новому направлению нужны были молодые кадры. И Михаил Александрович готовил их. Параллельно с работой в Институте физики он читал лекции в БГУ, а затем организовал там кафедру атомной и молекулярной физики. На специализирующей кафедре проходили подготовку не только студенты, но и аспиранты, как советские, так и иностранные.

В белорусский период Михаил Александрович завершил написание монографии «Атомная и молекулярная спектроскопия», ставшей настоящей энциклопедией для многих поколений физиков-спектроскопистов. Совместно со своими учениками он разработал методы и аппаратуру диагностики низкотемпературной плазмы, изучил процессы зарождения плазмы в плазмотронах и плазменных ускорителях, провел исследования

излучательной способности нагретых до высоких температур газовых потоков, выявил особенности воздействия плазменных потоков на металлы и композиционные материалы. Усилиями Михаила Александровича была сформирована белорусская научная школа по физике плазмы, получившая мировую известность.

Живя и работая в Минске, он создал научные коллективы, которые совместно с Михаилом Александровичем принимали самое действенное участие в разработке оптико-электронной системы раннего обнаружения пуска баллистических ракет и других исследованиях военной тематики. В 1966 г. за вклад в решения оборонных задач Михаилу Александровичу была присуждена Ленинская премия.

Весомый вклад внес М.А. Ельяшевич в изучение истории физики. Его работы о Менделееве, Эйнштейне, Боре, Максвелле, Ридберге, Ритце о становлении квантовой механики отличались глубиной и объективностью. Публикации Михаила Александровича по истории науки трудно назвать статьями: как правило, их объем составлял 40–50 страниц журнала «Успехи физических наук». Его лекции для студентов по истории физики были насыщены яркими примерами очевидца, их с интересом посещали преподаватели и сотрудники. Мне, тогда декану физического факультета, запомнились эти лекции не только образностью изложения, но и показом динамики важнейших научных открытий, раскрытием методологии научного поиска, умением вычлнить вклад конкретного ученого в решение общей проблемы, рассказами эпизодов из личной жизни известных ученых.

Являясь одним из крупнейших спектроскопистов, к тому же свободно владеющим английским, французским, немецким и достаточно хорошо итальянским языками, Михаил Александрович

достойно представлял нашу науку на международных конгрессах, конференциях, симпозиумах. Его имя хорошо знали в ученном мире и приглашали выступать с докладами. Он несколько раз побывал в Германии, Франции и Испании, а также посетил Японию, Англию, Канаду, Италию, Югославию, Австралию и США.

Разноплановая научная работа в БГУ и Институте физики, общие лекции по атомной физике, специальные курсы по спектроскопии сложных молекул, по истории физики, консультации аспирантов и докторантов, рецензирование и редактирование научных работ, командировки на закрытые объекты — все это можно было успеть только благодаря незаурядному таланту, колоссальной трудоспособности и целеустремленности Михаила Александровича.

В памяти всплывают сотни эпизодов общения с Михаилом Александровичем за многолетний период нашей совместной работы в Белорусском государственном университете. Это и яркие выступления на заседаниях студенческого научного общества и лекции Михаила Александровича, которые мне запомнились со студенческих лет, и его увлекательные популярные доклады на конференциях молодых ученых, и выступления при вручении дипломов выпускникам, на заседаниях ученых советов при защитах диссертаций и многое другое. Исследуя закономерности массопереноса и образования новых фаз при ионной имплантации металлов, я неоднократно консультировался у Михаила Александровича, а в 1981 г. под его руководством помогал решать организационные вопросы по проведению Международной конференции по ионизованным газам, которая проходила в Минске с участием огромного числа (более 200) иностранных гостей.

В 70-е и 80-е гг. с Михаилом Александровичем мы десятки раз обсуждали вопросы развития науки и методологии исследований, проблемы подготовки специалистов-физиков и методики преподавания. Обычно наши беседы проходили в процессе праздничных демонстраций, когда после рукопожатий сослуживцев на сборном пункте колонны трудящихся, дожидаясь своей очереди прохода перед правительственными трибунами, то медленно передвигались, то останавливались, чтобы вписаться в определенном месте нескончаемого потока. Михаил Александрович брал меня под руку, и мы подолгу прогуливались вдоль университетских колонн, обсуждал самые разные вопросы. Михаил Александрович не пропускал ни одной праздничной демонстрации, и наши

прогулки-беседы были регулярными, а для меня чрезвычайно полезными. Многие мои работы по методике преподавания физики были инициированы Михаилом Александровичем.

По его рекомендации я был включен в состав делегации СССР на Международную конференцию по физическому образованию, организованную ЮНЕСКО в Праге в августе 1980 г. Отмечу, что в сформированную Минвузом и АН СССР делегацию входило лишь пять человек, и только благодаря авторитету Михаила Александровича могло состояться мое участие в этой конференции.

Как ученый, как специалист в своей области Михаил Александрович проявлял себя блистательно, ярко, компетентно, доброжелательно и в то же время требовательно, строго следуя научной логике. Являясь по натуре добрым человеком, своими убеждениями он не поступался, дипломатично, но недвусмысленно расставлял, как говорят, все по ранжиру.

Остановлюсь на двух эпизодах, не связанных непосредственно с научной или преподавательской деятельностью, но характеризующие Михаила Александровича как человека, искренне болеющего за результаты любого дела, за которое он взялся.

Эпизод первый. В рамках политической учебы на физическом факультете ежемесячно проводились семинары преподавателей и сотрудников. К таким семинарам отношение было, мягко говоря, несерьезное. Я, тогда заместитель секретаря партбюро, обратился к Михаилу Александровичу за советом, как изменить отношение к семинару. Он предложил свою тематику: «Проблемные вопросы философии естествознания» и стал руководителем этого семинара. И дела пошли. На заседания семинара никого не требовалось загонять, пришлось переходить в большую аудиторию. К занятиям готовились, их ждали, всем было интересно.

Эпизод второй. Михаил Александрович и профессор МГУ В.А. Матвеев являлись сопредседателями методического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР по преподаванию физики в вузах. Выезжая на заседания совета, Михаил Александрович иногда приглашал меня с собой. В одну из таких поездок (в ноябре 1982 г.) методический совет должен был подготовить к утверждению новый учебный план по специальности «Физика».

Когда на методическом совете Минвуза СССР обсуждение нового учебного плана было в разгаре, министерский управленец сообщил о смерти

Л.И. Брежнева и сказал, что министр распорядился в течение часа прекратить работу всех служб, работу методического совета перенести на неопределенное время и всем иногородним в течение 1–2 дней уехать из Москвы. Однако Михаил Александрович не любил откладывать незаконченные работы. Он призвал всех переехать в гостиницу и там завершить подготовку разрабатываемого учебного плана. Доводы Михаила Александровича были столь убедительны, что все, в том числе и министр, согласились.

Мы, представители всех союзных республик и регионов Российской Федерации, жили в минувшей гостинице «Университетская», поэтому все, включая москвичей, поехали туда. Михаил Александрович разделил нас на группы и каждой группе дал задание. Три группы разрабатывали предложения по очередности курсов, их наполнению и количеству часов, выделяемых на тот или другой предмет. Еще три группы работали над перечнем специализаций и их наполнением. Мы работали вторую половину дня и практически всю ночь. Михаил Александрович челноком ходил от группы к группе, проверяя и корректируя наши наработки. К утру (примерно в 5 часов), в очередной раз проинспектировав нас, он, довольный результатами, распорядился 3 часа поспать и на 9.00 назначил пленарное заседание.

На утреннем заседании Михаил Александрович поблагодарил всех за усердную и продуктивную работу, заставил всех внимательно прочитать сведенный им воедино итоговый документ и высказать замечания. Замечания были, но несущественные, их все равно обсудили. «Ладненько, мы все сделали. Сейчас машинистка все оформит начисто. А мы пойдем завтракать. После завтрака все соберемся, и каждый подписью удостоверит свое согласие. Дальше — дело министра, утверждать или не утверждать», — подвел итог работы Михаил Александрович. Я понял, что, отпустив нас отдыхать, он дорабатывал документ и в эту ночь совсем не спал. Мы работали примерно 15–16 часов. А Михаил Александрович еще больше, в свои-то 74 года. Общая обстановка в стране не позволяла нам как-то отметить наш ударный труд, но все, и особенно присутствующие деканы и ректоры, были довольны подготовленным планом.

Хочу еще остановиться на важных для каждого человека семейных отношениях. Высокое чувство к избраннице, создание семьи, любовь и теплые взаимоотношения на протяжении десятилетий — особая книга жизни Михаила Александровича. И все, что я знаю из этой книги

(из личных бесед с Михаилом Александровичем и от его дочери Наташи, с которой знаком со студенческих лет), отражает самые высочайшие человеческие качества М.А. Ельяшевича.

Михаил Александрович Ельяшевич — молодой, подающий надежды ученый — и машинистка завода «Севкабель» Мария Георгиевна Евграфова познакомились на ледовой дорожке катка в феврале 1935 г. Пылкие чувства двух молодых людей не могли пригасить уговоры и предстоящие трудности. У осиротевшей девятнадцатилетней невесты на иждивении были две младшие сестры и брат. Михаил Александрович был непреклонен. Высокое чувство победило, и в профессорскую семью была принята простая девушка, обремененная заботой о ближайших родственниках. В мае они поженились. Потом был рабфак и учеба в 1-м Ленинградском медицинском институте. Преодолевать трудности помогала любовь. Они были счастливы от головокружительных чувств, перспективных планов и радужных ожиданий. Но в день последнего выпускного экзамена Марии Георгиевны в медицинском институте объявили о начале войны.

Радость и огорчения они делили на протяжении более 60 лет и каждый год 10 февраля отмечали день своего счастливого знакомства. Вырастили троих детей, дали им прекрасное образование. Они перенесли эвакуацию, потерю близких людей, незаслуженное увольнение Михаила Александровича, обидные отказы в работе, унижающее безденежье того периода. А сколько сил и волнений доставляла ситуация, когда семья жила в Ленинграде, а Михаил Александрович работал в Москве?! Но самым трудным периодом для семьи было время, когда Михаил Александрович был отстранен от работ по закрытой тематике, уволен из Государственного оптического института, а затем из Ленинградского института точной механики и оптики. Встретив неожиданно навалившиеся на него испытания с подлинным мужеством, Михаил Александрович не прекратил научную работу, а терпеливо боролся (в том числе и показывая новые результаты) против обвинений в свой адрес.

Минуты радостного настроения, которые приходили с творческим успехом, успехами своих детей и своих многочисленных учеников, наградами, денежными вознаграждениями, признанием окружающих и государства, почестями и новыми возможностями работать и творить, творить и работать, работать — тоже были общими.

Мария Георгиевна старалась окружить мужа заботой и вниманием, не хныкать, сдерживать

и скрывать свои переживания, чтобы не отвлекать, не мешать главному делу, которому служил Михаил Александрович, — работе.

Однако Михаил Александрович был не тем человеком, который мог бы переложить семейные заботы на другого, пусть близкого и ответственного человека. Горести, успехи и неудачи родных не оставались незамеченными Михаилом Александровичем. Он не только интересовался, вмешивался и корректировал поступки своих детей, но и разделял с ними свой досуг, ходил в театр, на праздничные демонстрации.

Ярким примером заботы Михаила Александровича о близких людях служит один его очень показательный сыновний поступок. Александр Борисович, отец М.А. Ельяшевича, в 1949 г. как бывший эсер высокого ранга был арестован и отправлен по железнодорожному этапу вместе с уголовниками в Сибирь. Михаил Александрович, переживая за здоровье своего 62-летнего отца, бросил все дела и сопровождал своего отца по всему

пути от Москвы до Канска, поддерживая его продовольственными передачами, выхлопотанным медицинским обслуживанием, своими свиданиями. Но даже для заслуженного человека (к тому времени М.А. Ельяшевич был награжден орденом Ленина и дважды удостоен Сталинской премии), такой вояж не был безопасным. И Михаил Александрович в конечном итоге пострадал из-за этого. Зная опасность, он не стал уговаривать себя: «все обойдется, да и стар отец», а своими действиями спас отца. Александр Борисович в 1953 г. вернулся в Ленинград, еще 8 лет работал профессором экономического вуза и умер в 1967 г. в возрасте 79 лет.

Несмотря на изменение моего возраста и статуса (от студента до декана факультета, секретаря партийного бюро, заведующего отделом), Михаил Александрович постоянно вызывал (и продолжает вызывать) у меня чувство восхищения его умом, деловитостью, высочайшей интеллигентностью, деликатностью, неподдельным вниманием, желанием помочь.

АЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ МАХНАЧ

Я хорошо знал Александра Семеновича Махнача по работе в Академии наук. Это выдающийся белорусский ученый-геолог, академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки, лауреат Государственной премии БССР, педагог, общественный деятель, участник Великой Отечественной войны.

Начало научной деятельности Александра Семеновича совпало с бурным ростом темпов геологических работ в Беларуси. Он был одним из тех, кто закладывал фундамент белорусской геологии. А.С. Махнач вместе со своими коллегами и учениками многие годы участвовал в геологических экспедициях, занимался лабораторными исследованиями горных пород, обобщал результаты их изучения, составлял и редактировал геологические карты, принимал участие в прогнозировании размещения в недрах Беларуси многих полезных ископаемых, в том числе таких важных, как калийная и каменная соли, нефть, железные руды.

В 1969–1973 гг. А.С. Махнач — главный ученый секретарь Президиума АН БССР, в 1973–1986 гг. — вице-президент, первый вице-президент АН БССР. Он был депутатом и членом Президиума Верховного Совета БССР нескольких созывов, а в 1985–1990 гг. возглавлял Постоянную комиссию по науке и технике Верховного Совета БССР.

На протяжении многих лет он был не только одним из лидеров белорусской геологической науки, но и главой геологической семьи. Его супруга — Нина Александровна, сыновья Анатолий Александрович и Николай Александрович — ученые-геологи.

Академик С.А. Астанчук

СЫНОВЬЯ ОБ ОТЦЕ

А.А. Махнач, академик, главный научный сотрудник Белорусского научно-исследовательского геологоразведочного института

Отец родился в 1918 г. на Узденщине в д. Хотляны. Его родители — Семен Акимович и Прасковья Аксеновна — были простые крестьяне. Отец — участник Первой мировой войны, умер в 1919 г. Мать осталась одна с шестью детьми, Алесь был младшим. Жизнь была нелегкой.

После окончания семилетней школы и обучения в Минском педагогическом техникуме и на рабфаке (ст. Негорелое) отец в 1936 г. поступил на географический факультет Высшего педагогического института в Минске. Занимаясь в институте, он одновременно преподавал в школе рабочей молодежи. Стране были нужны учителя, поэтому студента Махнача Наркомпрос БССР с 4-го курса пединститута направил в школу д. Рудня на Червенщине. Отец совмещал работу в школе с завершением высшего образования и в июне 1940 г. с отличием окончил институт. А осенью того же года он сменил портфель сельского учителя на шинель солдата Красной Армии. Войну он встретил в районе Перемышля, до самого ее конца находился на фронте, защищая и освобождая сначала советскую землю, затем Польшу и Чехословакию, участвовал во взятии Берлина и освобождении Праги.

После демобилизации в 1946 г. отец короткое время работал в Министерстве просвещения БССР, а затем в ЦК ЛКСМБ, где был заместителем заведующего отделом школ и пионеров. Но по складу ума его влекла наука и он, будучи комсомольским работником, в январе 1947 г. поступил в очную аспирантуру Института геологических наук АН БССР. В то время тон в работе комсомола Беларуси задавали три секретаря ЦК: М.В. Зимянин (первый секретарь), К.Т. Мазуров (второй секретарь, вскоре сменивший М.В. Зимянина), П.М. Машеров (секретарь по кадрам). Они видели в отце будущего партийного работника, на учебу в аспирантуре не отпускали и решительно настаивали, чтобы он согласился пойти работать секретарем Минского обкома комсомола с перспективой возвращения в ЦК ЛКСМБ на более высокую должность. В это время решалась судьба отца: быть ему ученым или партийным работником. И все-таки по его настоянию в марте 1947 г. было вынесено решение Бюро ЦК ЛКСМБ о его освобождении от работы

в ЦК. Почему я так подробно остановился на этом эпизоде из жизни отца? Наверно потому, что нам с братом до сих пор остается непонятным, в чем источник той решительности, с которой парень из глухой провинции отказался от возжеленной для многих партийной карьеры ради высокой идеи — посвятить себя науке.



Аспирант А.С. Махнач. 1949 г.

В то время в первые годы после окончания войны в Институте геологических наук не было никаких условий для научной работы. В нем работало 15–20 человек, все во главе с директором располагались в одной комнате площадью 35–40 м². Здесь же оставались ночевать 3–4 сотрудника, которым негде было приютиться. В институте, как и во всей академии, не было приборов, библиотеки. В такой ситуации не могло быть и речи о выполнении кандидатской диссертации в Минске. Перед отцом была поставлена задача — найти в Москве научного руководителя и научное или учебное заведение, в котором можно было бы выполнить диссертационные исследования. После длительных переговоров научным руководителем отца согласился стать крупнейший советский геолог член-корреспондент АН СССР Л.В. Пустовалов из Московского нефтяного института (теперь это Российский государственный университет нефти и газа). Правда, его смущало то, что отец был по

образованию географом, а поступил в аспирантуру по геологической специальности (литология, т. е. наука об осадочных горных породах). Поэтому Л.В. Пустовалов поставил перед аспирантом Махначом условие: наряду с подготовкой кандидатских экзаменов и работой над диссертацией, освоить все специальные курсы программы геологического факультета Московского нефтяного института. И отцу пришлось за отведенные три года не только собрать и обобщить большой фактический материал, но также сдать экзамены по десятку геологических дисциплин. По сути дела, он параллельно с подготовкой кандидатской диссертации получил второе высшее образование. В 1950 г. отец защитил кандидатскую диссертацию на ученом совете Московского нефтяного института.

С 1950 г. и до последних дней жизни (2006 г.) А.С. Махнач работал в Институте геологических наук АН БССР, в 1963 г. переданном в Управление геологии при СМ БССР (БелНИГРИ), затем в Институте геохимии и геофизики НАН Беларуси. В 1955–1989 гг. он заведовал созданной им литологической лабораторией.

Я горжусь тем, что в 1950-е гг., когда на территории Беларуси было широко развернуто бурение съемочных скважин и стал бурно накапливаться геологический материал, отец оказался одним из тех, кто смог по-новому взглянуть на сумму фактов и избежать магической власти научных авторитетов. Залегающую на кристаллическом фундаменте мощную красноцветную толщу песчано-алевритовых и песчано-глинистых пород геологи вслед за корифеями Е.А. Оппоковым, П.А. Тутковским, А.Д. Архангельским, А.П. Карпинским тогда относили к девонской системе. Обработка материалов по скважинам, пробуренным в Минске, Смилевичах, Орше, Городке, Верхнедвинске, Глуске, Пинске, близ Старобина, в районе Бреста — Кобрин, позволила отцу впервые убедительно доказать, что это гораздо более древние (в терминологии А.С. Махнача тех лет, экембрийские, теперь — верхнепротерозойские) образования. Это была принципиально важная корректировка представлений о геологическом строении Беларуси — она существенно повлияла на оценку перспектив территории на полезные ископаемые. Результатом этой и других работ отца в те годы стала его обобщающая монография «Древнепалеозойские отложения Белоруссии» (1958 г.). Она, по существу, явилась его докторской диссертацией, которую он защитил в 1959 г. в Геологическом институте АН СССР. Мне при-

ятно отметить, что ровно через 30 лет в том же самом конференц-зале Геологического института докторскую защищал я.

Я коснулся только самого начала научной деятельности отца. О его дальнейшей научной работе скажу короче.

О широте научных интересов отца и о значении его работ свидетельствует уже простое перечисление наиболее крупных монографий, написанных с его участием и под его руководством. Это «Литология и геохимия девонских отложений Припятского прогиба в связи с их нефтеносностью» (1966), «Вулканогенная формация верхнего протерозоя (венда) Белоруссии» (1970), «Геология СССР. Том 3. Белорусская ССР» (1971, 1977), «Литология и геохимия кор выветривания, развитых на кристаллическом фундаменте Белоруссии» (1973), «Рифей и венд Белоруссии» (1976), «Верхнедевонская щелочная вулканогенная формация Припятской впадины» (1977), «Органогенные постройки девона Белоруссии» (1984), «Кембрий Белоруссии» (1985), «Давсонит Беларуси» (1995), «Геология Беларуси» (2001), «Основы геологии Беларуси» (2004).

Особо хочу остановиться на книге «Геология Беларуси», 2001. Эта монография имеет объем 100 печатных листов и содержит обобщенные результаты геологических исследований территории нашей страны за последние 30–35 лет. Коллеги и ученики отца признают, что именно ему принадлежит главная роль в организации обобщения этого колоссального по объему и разнообразнейшего по содержанию материала, в объединении для работы чрезвычайно большого количества авторов, порой с разными точками зрения на один и тот же вопрос. А отцу во время подготовки книги было уже больше 80 лет.

Всего же в послужном списке отца более 400 научных публикаций, в том числе 30 монографий и книг.

На протяжении 20 лет он работал по совместительству доцентом, профессором Белорусского госуниверситета и Минского педагогического института. Более 30 его учеников стали кандидатами наук, а три из них — докторами.

Я с гордостью храню священные для меня отцовские реликвии: ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», Франциска Скорины, Отечественной войны II степени, медали «За отвагу», «За взятие Берлина», «За освобождение Праги», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

Н.А. Махнач, канд. геол.-минер. наук, ведущий научный сотрудник Белорусского научно-исследовательского геологоразведочного института

В течение 45 лет я жил под одной крышей с отцом и его близкое присутствие воспринимал как должное, не чувствуя необходимости вникать в подробности его прошлого и особенности его личности. Сам он никогда не пускался в долгие рассказы о себе, и некую цепь событий его молодости можно было реконструировать по отрывочным коротким замечаниям, сделанным вскользь, в контексте беседы об ином.

От времен отцовской молодости в нашей семье осталось очень мало материальных свидетельств. Буквально несколько снимков довоенных и военных лет занимают первые страницы семейного фотоальбома. Чудом уцелел потрепанный учебник топографии для артиллеристов, который отец изучал в период офицерской переподготовки в Чирчике и Иркутске (август 1943 г. – январь 1944 г.), недолгого перерыва во фронтовой службе. Как реликвией я владею тяжелым мельхиоровым портсигаром, подаренным Александру Махначу сотрудниками кафедры петрографии осадочных пород Московского нефтяного института в «памятный день 30 мая 1950 г.». Примечательно, что неконкретная формулировка «памятный день» здесь употреблена неслучайно, так как 29 мая 1950 г. отец женился на нашей матери Нине Александровне Базылевой, а на следующий день защитил кандидатскую диссертацию.

На моей книжной полке стоит небольшая книга 1936 г. издания «Тропическая природа» Альфреда Уоллеса, одного из авторов (наряду с Чарльзом Дарвином) теории происхождения видов. Эта книга была подарена отцу его одноклассником Иваном Николаевичем Соловьем (впоследствии известным почвоведом) 15 августа 1945 г. в Бресте, т. е. практически в тот же самый день, когда лейтенант Махнач со своей батареей пересек границу Советского Союза при возвращении из освобожденной Европы. Я иногда пытаюсь представить своего двадцатилетнего отца, прошедшего от Перемышля до Сталинграда и от Сталинграда до Берлина и Праги, читающим при свете керосиновой лампы книгу о дождевых лесах Малайского архипелага и Амазонии и пока не знающим, что вся его жизнь будет посвящена изучению еще более далеких протерозойских и палеозойских миров.

Мои первые личные воспоминания об отце относятся к самому началу 1960-х гг. и связаны с тем, возможно, самым счастливым периодом в его жизни, когда он, молодой доктор наук, был со-



Гвардии лейтенант А.С. Махнач. Ростов-на-Дону. 1944 г.

средоточен только на творческой работе, а научно-административные должности были еще в будущем. В то время среди моих любимых игрушек были деревянные фигурки кристаллографических форм, и раньше, чем научиться читать, я знал, что такое дигексагональная пирамида, тетрагональный скаленоэдр или пентагонтриоктаэдр. Одним из моих развлечений было любованье игрой изменчивых цветов интерференции в скрещенных николях поляризационного микроскопа. До сих пор хвойный запах канадского бальзама (вещества, которое применяется при изготовлении петрографических шлифов) ассоциируется для меня с уютной обстановкой отцовского кабинета.

Разумеется, детские и юношеские воспоминания, в основном, связаны не с работающим, а с отдыхающим, более доступным, отцом. Особенно запоминающимися были недели летнего отпуска, которые наша семья проводила вне Минска (деревня Околица около Раубичей, Подмосковье, Евпатория, Мисхор, Друскенинкай, Паланга, Юрмала). Во всех этих путешествиях отец всегда

оставался внимательным наблюдателем природы и по мере возможности удовлетворял свои геологические и географические интересы.

Первая запомнившаяся мне поездка состоялась в июне 1962 г. По пути в Симферополь отец время от времени призывал к особому вниманию («Через полчаса будем переезжать Днепр; вот здесь кончается лес, и начинается степь; сейчас поедем вдоль берега Сиваша»). В Евпатории отец насильно затаскивал меня в море и старался научить плавать, держа на руках. Он утверждал, что неумение плавать — это очень большой порок, поскольку на войне при форсировании рек от неумения держаться на воде погибало не меньше солдат, чем от пуль и снарядов.

Намного позже (я уже был старшеклассником), когда наша семья отдыхала в Мисхоре, в один ненастный день мы поплыли на корабле в Никитский ботанический сад, где, глядя на туристическую схему, отец первым делом увлек меня и мать на поиски араукарии чилийской, представленной единственным в саду экземпляром. Вскоре я понял острый интерес отца к этому экспонату. Именно араукарии имеют репутацию живых ископаемых, их первые находки в осадочных отложениях датируются возрастом в 240 млн лет. Считается, что молодая араукария со стволом, сплошь покрытым колючими листьями, напоминает своим внешним обликом древнейшие хвойные. Говорят, что птицы никогда не садятся на араукарию, что как бы подчеркивает ее принадлежность к иному миру. Наконец, мы нашли то, что искали. Пространство диаметром метров десять вокруг дерева было обнесено проволочной сеткой. Отец долго молча ходил вокруг него и потом сказал: «Вот за этим забором — клочок мезозойской Земли».

Несколько раз мы отдыхали в Прибалтике. Здесь я увидел другое, холодное море. Меня всегда удивляло, что в холодную воду отец заходил без всякой потребности в адаптации к температурному контрасту, выказывая раздражение моей нерешительностью при погружении в море. Во время нашего пребывания в Паланге было несколько дней с сильным волнением. Отец с нетерпением ждал, когда бурная погода

сменится штилем, поскольку именно в первый день после шторма с наибольшей вероятностью можно найти выброшенный на берег янтарь. И действительно, среди водорослей мне удалось добыть несколько мелких кусочков окаменелой смолы, первых в моей жизни геологических образцов, которые отец потом долго хранил в своем столе.

Помню, что отец с большим уважением относился к Литве и литовцам и однажды заметил, что в образе здешней жизни, облике поселков и городов, во многом другом чувствуется, что эта страна совсем недавно имела свою государственность и вполне могла бы обойтись без «старшего русского брата».

Наши летние семейные поездки прекратились в конце 1960-х — начале 1970-х гг.: дети повзрослели, отец стал занимать научно-административные должности (главного ученого секретаря, вице-президента белорусской Академии) и становился все более занятым. В вечерние часы после возвращения с работы, а также в выходные дни он практически не покидал из кабинет, и о его присутствии в доме можно было судить по стрекотанию пишущей машинки. Он соблюдал свой стихийно сформировавшийся режим дня: рано вставал и рано ложился (в новогоднюю ночь он покидал праздничный стол в пять минут первого). Какое-то время перед сном он посвящал чтению ненаучной литературы и никогда не засыпал, не прочитав хотя бы несколько страниц. Отец высоко ценил поэзию Кондрата Крапивы (в особенности его басни), Павлука Труса, Максима Богдановича, Янки Купалы, Александра Твардовского. Он вос-



На заседании Бюро Президиума АН БССР. Слева направо: Н.Д. Нестерович, К.В. Горев, Н.А. Борисевич, А.С. Махнач, А.С. Дмитриев. 1970 г.

хищался белорусским языком и литературным талантом Владимира Короткевича, что не мешало ему высказывать некоторые критические суждения об этом писателе: «Дикую охоту короля Стаха» он как-то назвал блестяще сделанным переводом «Собаки Баскервиллей». Отец был не чужд сатирической литературы: зачитывался «Похождениями бравого солдата Швейка», любил сказки Салтыкова-Щедрина, рассказы Михаила Зощенко. Одним из его любимых писателей был драматург Александр Островский. С особым вниманием отец читал художественную литературу о науке: «Русский лес» Леонида Леонова, «Кто смеется последним» и «Врата бессмертия» Кондрата Крапивы.

В преклонном возрасте в его литературных предпочтениях появилась одна странность: излюбленным жанром стала детская и юношеская приключенческая литература. Он читал и перечитывал «Всадника без головы», «Копи царя Соломона», «Путешествие к центру Земли», «Детей капитана Гранта», «Пятнадцатилетнего капитана», «Двадцать тысяч лье под водой», «Робинзон Крузо», «Гаргантюа и Пантагрюэль», «Трех мушкетеров», «Графа Монте-Кристо», «Рассказы о Шерлоке Холмсе». Возможно, в таком выборе книг проявлялась его ностальгия по молодости. К своему сожалению я так и не успел спросить у него, когда он читал эту литературу впервые. Не исключено также, что в его любви к приключенческому жанру выразилась натура истинного ученого: ведь как кто-то сказал: «Ученые — это люди, которые всю жизнь сохраняют детское восприятие жизни (умение удивляться, задавать вопрос “Почему?”, интересоваться “иными мирами”»).

Свой режим «жаворонка» отец нарушал только ради спортивных телепередач. Он любил конькобежные и лыжные гонки, биатлон, легкую и тяжелую атлетику, футбол, хоккей. К некоторым просмотрам он относился с педантичностью аналитика. Во времена черно-белого телевидения, когда техника трансляции была убогой по сегодняшним меркам, он часто садился к экрану с секундомером. Например, наблюдая стайерский забег на коньках, он засекал время пересечения спортсменом какого-либо ориентира, имеющегося в поле зрения, и таким образом предсказывал финальный результат. При этом он делал одному ему понятные заметки и расчеты на полях попавшихся под руку газет, и вся семья знала, что пока идет чемпионат, эти газеты трогать нельзя.

Один из таких спортивных вечеров (в начале марта 1977 г.) запомнился мне по особой причине. Тогда я стал свидетелем удивительной геоло-

гической интуиции отца. Мы сидели у телевизора и следили за хоккейным матчем. Вдруг закачалась лампа, зазвенела посуда в буфете, исказилось телевизионное изображение, задрожал пол. На мой вопрос «что это значит?», отец тут же ответил: «Это значит, что завтра утром узнаем о серьезных разрушениях где-нибудь в Карпатах». И действительно, оказалось, что минские трех- или четырехбальные толчки были отголосками сильного землетрясения с эпицентром в румынском городе Вранча.

Помимо спортивных телепередач никакие причины (за исключением болезней близких) не нарушали режим отца. Мне помнится лишь одно исключение из этого правила. Как-то, будучи студентом, я возвращался домой за полночь и, приближаясь к дому, увидел свет в отцовском кабинете. Подумав «что-то случилось», я ускорил шаг и вскоре убедился, что секрет ночного бдения заключался в ином. Оказалось, что отец обнаружил подготовленный мной реферат по курсу философии, посвященный анализу книги Энгельса «Диалектика природы». Как мне думалось, это было не самое худшее мое студенческое произведение, поскольку я старательно и с интересом прочитал реферированный труд. Однако к главе о роли «Диалектики природы» для современной науки я отнесся формально и попросту переписал из Большой Советской Энциклопедии начала 1950-х гг. некий текст, раскрывающий эту проблему, и, в частности, восхваляющий труды Т.Д. Лысенко и О.Б. Лепешинской и клеймящий позором менделистов — морганистов — вейсманистов. Отец за несколько часов заново создал главу реферата, и мне пришлось до утра переписывать ее на чистовик.

Как и любому человеку, мне наиболее памятливы недавние времена. Поэтому мне особенно близок образ пожилого отца. Вспоминая его поздние годы, мне хотелось бы отметить некоторые необычные, на мой взгляд, черты его личности, которая представляла собой конгломерат крестьянина, солдата, ученого. Этапы своей жизни он словно не оставлял позади, а брал с собой в дальнейший путь.

Его крестьянская сущность проявлялась по-разному. В пожилом возрасте значительную часть своего досуга он посвящал даче, которая служила ему, главным образом, для удовлетворения ностальгических амбиций земледельца. Часто по выходным отец с первой электричкой в одиночестве уезжал в Крыжовку (в 20 км от Минска) и целый день проводил в огороде.

Одной из немногих сельскохозяйственных культур, дающих приличный урожай на даче отца,

были яблоки. Ради сохранения урожая отец однажды решил изготовить домашнее вино. При первом опыте готовое вино (его было литров пятьдесят) было разлито в бутылки, часть из которых вскоре взорвалась. Я сказал отцу, где-то услышав краем уха, что вино надо купировать, т. е. в конце процедуры приготовления добавлять немного спирта для прекращения брожения. Ему эта идея понравилась, поскольку была выяснена причина неудачи. В вино следующего урожайного года он для верности добавил такое количество спирта, что конечный продукт превратился в очень крепкий напиток, который на вкус воспринимался, как легкое вино. Когда мы со старшим братом сообщили отцу о чудесных свойствах приготовленного вина, первыми испытав на себе его коварство, он ответил, что однажды такое вино уже пил. Это было после войны в Чехословакии. Один гостеприимный чех угостил пятерых закаленных фронтовиков бутылкой столетнего вина — гордостью своего погреба, после чего все они с трудом встали из-за стола. При этом отец заметил, что чешскому виноделу понадобилось для приготовления вина сто лет, а ему самому — один месяц.

В преклонном возрасте отец полюбил ходить на рынок и никому не доверял продовольственных покупок. Такие походы были для него своеобразным развлечением, на Комаровке он вел себя, как на восточном базаре, вступал в долгие беседы с продавцами и бывал очень доволен, если торгующие колхозники принимали академика Махнача за своего.

Вообще, отцу никогда не приходила в голову мысль о собственном превосходстве над теми, кто не отягощен дипломами, званиями и титулами. Именно в их среде он впервые увидел людей с незаурядными способностями. Одним из главных героев отцовских рассказов о детстве был живший в его деревне селекционер-самоучка, который скрещивал растения различных видов, родов и семейств и однажды после долгих опытов добился того, что на ели росли груши.

Одним из любимых видов отдыха для отца было собирание грибов. В связи с этим отцовским увлечением мне вспоминается один эпизод. Как-то я читал книгу Ферсмана «Воспоминания о камне», в которой сплошь и рядом попадались давние пометки отца. В одном месте я обнаружил пространный карандашный комментарий, впоследствии тщательно замазанный. Этот нечитаемый комментарий располагался возле слов «Нет, если вы не любите камня, если вы не понимаете его там, в горе, в забое, в руднике, если не умеете в самой природе читать законы прошлого... то



А.С. Махнач. 1980-е гг.

мертвыми останутся все ваши ученые трактаты... Лучше тогда оставьте их... и займитесь фунгоколлегологией! (то есть наукой грибособирания)». Я спросил у отца: «Что здесь было написано?». Он ответил, что точно не помнит, но пометка выражала несогласие с неуважительным отношением Ферсмана к собиранию грибов.

Иногда мне казалось, что в личности отца отчетливо проступает фронтовой солдат, с легкостью переносящий любые лишения. К своим болезням он относился с полным пренебрежением, как будто физическая боль не имела над ним никакой власти. Я не помню ни одного случая, чтобы высокая температура послужила для него причиной не пойти на работу. В преклонном возрасте он дважды перенес переломы. Как-то весной 1997 г. во время гололедицы он отправился в академию, но вскоре неожиданно вернулся. Было очевидно, что у него сломана и смещена плечевая кость. Прибывшая вскоре медицинская бригада наложила временную шину и отвезла пострадавшего (в моем сопровождении) в больницу скорой помощи в Курасовщину. Там мы с отцом просидели часа три в коридоре, наблюдая вереницу каталок с тяжело травмированными пациентами, и после наложения гипса получили разрешение отправиться домой. Отец категорически отказался ехать на такси, считая это неоправданным барством. Когда мы вышли из автобуса неподалеку от дома, отец сказал: «Иди домой и успокой маму, а я продолжу свой путь на работу, поскольку лю-

бой замысел должен быть выполнен до конца». С большим трудом мне удалось убедить его отказать от этой затеи. Всю следующую неделю отец не мог спать лежа. Вечером он спокойно сидел в кресло, а утром, как ни в чем не бывало, вставал. Такие ночи никак не отражались на его самочувствии и работоспособности. В старости отец стал быстро терять слух и зрение, однако это не вызывало в нем никакого беспокойства.

Вообще, его отношение к собственной старости и некоторые шаги, сделанные в преклонные годы вызывают у меня удивленное уважение. В какой-то момент у него появилась цель увидеть ясно сформулированный итог своей жизни, и он начал «собирать камни». Грандиозным, на мой взгляд, итогом этого «собрания камней» явилась толстая книга «Геология Беларуси», создание которой было инициировано отцом и реализовано им самим, его коллегами, учениками, учениками учеников. Таким образом, академик Махнач смог сравнить ту почти «чистую доску» белорусской геологии времен своей молодости с детальным описанием кристаллического фундамента и всех горизонтов осадочного чехла — результатом, полученным в течение его научной жизни.

Подводя итоги, отец написал две книги мемуаров, в которых с высоты старческой мудрости взглянул на жизнь довоенной белорусской деревни, кампанию коллективизации, сталинские репрессии, события войны, послевоенную жизнь советской Белоруссии, устройство академической системы. Также он попытался разобраться в тех изменениях, которые внес во все сферы жизни распад огромной общей страны. Он никогда не оценивал события двух последних десятилетий в терминах «хорошо» или «плохо». При этом он понимал, что слово «наука» стало не столь высоким словом, как ранее, и что для молодежи открылись новые престижные и достойные поля деятельности. Поэтому, когда зашла речь о выборе карьеры его внуками, он спокойно и одобрительно отнесся к тому, что они не пошли по научной стезе: его старший внук стал юристом, средний — военным архитектором-строителем, а внучка — лингвистом-переводчиком. Он сказал: «Пусть в роду будет “новая кровь”».

Одна из особенностей жизни и личности отца, вызывающая у меня особенное восхищение, заключается в том, что, прожив 88 лет, он не устал от жизни и не потерял интереса ни к чему из того, что увлекало его в молодые годы. На закате своих лет он по-прежнему целый день проводил за рабочим столом и не позволял себе ни минуты праздности. Будучи домоседом, он с интересом следил за пере-

движениями своих младших родственников по открывшемуся миру. При этом иногда создавалось впечатление, что сам уже был везде. Часто получалось так, что я оказывался именно в тех далеких от дома местах, где давным-давно проходил мой отец. Как-то после моего возвращения из Польши, где я участвовал в конференции «Четвертичный период восточной части Сандомирской котловины», отец сказал: «Сандомирская котловина мне знакома, а точнее Сандомирский плацдарм, а особенно город Радомско, где на городском кладбище я похоронил многих своих однополчан». Позднее, после моего очередного приезда из предгорий Судет на границе Польши и Чехии, он сказал мне: «Я знаю Судеты. Много там погибло наших на марш-броске в Прагу уже после того, как был взят Берлин. Это был тяжелый переход по горным дорогам. Солдаты не спали несколько суток. Я решил, что как офицер буду ехать в кабине грузовика и не позволю себе заснуть во что бы то ни стало. И если бы на этом пути несколько раз не будил водителя, то остался бы лежать в одном из судетских ущелий».

Совсем недавно, в марте 2007 г., я со своими коллегами занимался бурением скважины в донных отложениях озера Сергеевского (или Муха, как оно раньше называлось). В керне таких отложений записана история природных обстановок, климата, растительности последних 14–15 тысячелетий. Изучение этой истории и есть моя профессия. Ручное бурение со льда — нелегкое дело. Целый день приходится быть на морозе и ветре, иногда по щиколотку в воде. Вытягивание тяжелого бура из вязкого дна требует больших усилий. К концу рабочего дня мое терпение было уже на исходе, холод пробирал до костей, замерзшая рука была неспособна сделать короткую запись в полевом дневнике. Вдруг в вечерних сумерках я увидел где-то у дальнего берега одинокого человека, идущего по льду по какой-то своей надобности. И тогда я вспомнил: «Это же то озеро Муха, которое мой молодой отец, студент минского педагогического техникума, много раз пересекал по льду на своем пешем ночном тридцатикилометровом переходе из родной деревни Хотляны в Руденск, откуда можно было доехать до Минска на поезде». И я подумал: «Мои сегодняшние трудности смешны по сравнению с трудностями зимнего ночного перехода моего отца. Мне не может быть холодно. У меня нет причин для усталости». И буквально физически ощутил смысл фигуры речи «теплые воспоминания». И еще я подумал: «Кое-что в моей жизни устроено очень правильно — я стою на тех же путях, по которым ходил мой отец, я продолжаю его дело, память о нем согревает меня».

УДК 536.46

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

А.И. Михлюк

ОАО «Минский автомобильный завод»

Введение

Метод объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) был разработан для специальных так называемых сталей пониженной прокаливаемости в 60-х гг. прошлого столетия известным советским специалистом в области индукционной термообработки профессором Шепеляковским К.З. [161, 162]. Сущность его состоит в том, что упрочняемое изделие из стали ПП после поверхностного индукционного нагрева подвергается высокоинтенсивному закалочному охлаждению. На поверхности на глубину прокаливаемости образуется мартенситная структура, а слои, нагретые выше точки $A_{с3}$, но расположенные глубже, закаляются на структуру троостита, сорбита и перлита. При этом за счет пониженного содержания примесей в стали, суммарное содержание которых не должно превышать 0,5 %, ограничивалась глубина прокаливаемости и закаленный слой формировался по контуру зубчатой поверхности. Внешний вид зоны прогрева и зоны упрочнения в этом случае представлен на рис. 1.

Метод нашел практическое применение, однако до настоящего времени не рассматривался в качестве равнозначного с химико-термической обработкой по прочностным свойствам и долговечности термообрабатываемого изделия, т. к. имел ряд недостатков.

Во-первых, ограничение глубина прогрева металла зубчатым венцом и некоторым слоем металла под ним, чтобы обеспечить прокаливаемость зубчатой поверхности, оставляли значительную часть металла детали вообще без какого-либо термического упрочнения.

Во-вторых, содержание углерода в сталях пониженной прокаливаемости и способы ее охлаждения после локального нагрева приводили к повышенному короблению зубчатой поверхности.

В-третьих, нагрев зубчатых поверхностей по описанной выше схеме путем радиального распространения температурных полей по сечению детали приводил к неравномерности нагрева зубчатой поверхности и, как следствие этого, увеличению глубины прокаливаемости и неравномерной твердости.

На ОАО «МАЗ» предложен, теоретически обоснован и реализован новый подход к объемно-поверхностной закалке тяжело нагруженных зубчатых деталей мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости. Суть данного подхода заключается в повышении конструкционной прочности изделия путем формирования напряженно-упрочненного состояния по всем поверхностям детали.

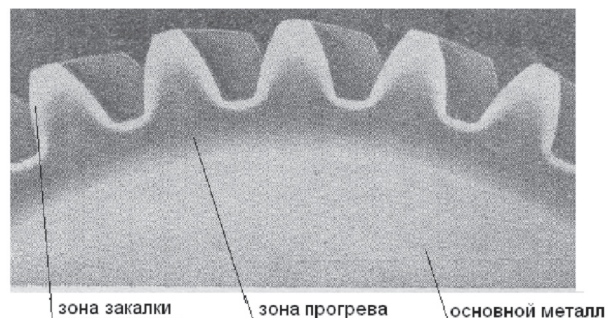


Рис. 1. Внешний вид распределения зон нагрева и закалки для зубчатых поверхностей из стали ПП после индукционного поверхностного нагрева

На рис. 2 показана схема предложенного подхода. В отличие от ранее применяемых схем нагрева деталей, имеющих зубчатые поверхности, когда индукционному нагреву подвергается слой металла, несколько превышающий глубину прокаливаемости, в данном случае производится сквозной индукционный нагрев детали с последующим ее охлаждением по всем поверхностям, включая и внутренние. Это позволяет получить закаленный слой по контуру детали и создать изделие с высокой конструктивной прочностью.

Исходя из предложенной схемы упрочнения, можно спрогнозировать, как сформируется напряженно-упрочненное состояние изделия. На рис. 3 показано распределение твердости при различных видах термообработки. Для поверхностной закалки характерно наличие четко выраженной зоны закалки ТВЧ и резкое падение твердости от закаленного поверхностного слоя к основному металлу (кривая 1). Для объемно-поверхностной закалки при локальном нагреве (кривая 2) обеспечивается более плавный переход твердости к основному металлу, но также имеется зона основного металла с исходной твердостью. Для объемно-поверхностной закалки при сквозном индукционном нагреве (кривая 3) упрочнению подвергается вся поверхность изделия с плавным переходом к основному металлу, причем твердость сердцевины металла может изменяться

в определенных пределах в зависимости от размеров изделия, равномерности и температуры нагрева и интенсивности охлаждения. В отличие от закалки ТВЧ или объемно-поверхностной закалки при локальном нагреве при данной контурной объемно-поверхностной закалке достигается упрочнение по всем поверхностям изделия с плавным снижением твердости к основному металлу. При этом в отличие от химико-термической обработки твердость сердцевины можно сформировать в зависимости от назначения и степени нагруженности изделия.

Применение подобного типа упрочнения позволяет получить в упрочненном изделии три зоны — зона закалки с твердостью 57 HRC min, микроструктура которой представляет мартенсит мелко- или среднегольчатый, зона промежуточных превращений с микроструктурой троостомартенсита, троостита или сорбита, твердость которой плавно снижается от 57 до 32–30 HRC, и зона металла, прошедшего структурные превращения с ускоренным охлаждением с микроструктурой сорбита и перлита пластинчатого, твердость которой составляет от 34 до 26 единиц HRC. На рис. 4 показано наличие трех вышеописанных зон упрочнения на детали, имеющей наружную зубчатую и внутреннюю шлицевую поверхность после закалочного охлаждения по контуру детали.

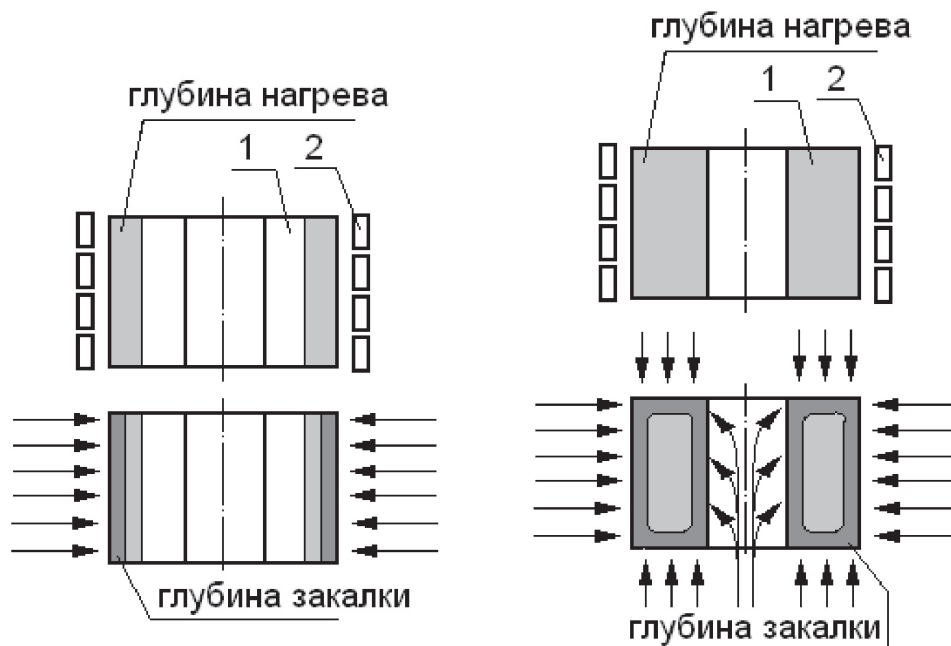


Рис. 2. Схема контурного объемно-поверхностного упрочнения изделия из стали ПП

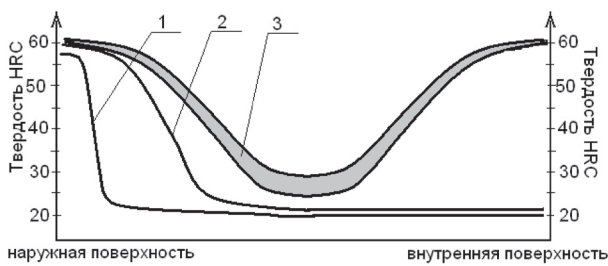


Рис. 3. Распределение твердости при различных типах упрочнения:
 1 — поверхностная закалка ТВЧ; 2 — объемно-поверхностная закалка при локальном нагреве;
 3 — объемно-поверхностная закалка при сквозном нагреве

При получении подобного распределения упрочненных слоев на поверхности детали данный метод упрочнения можно рассматривать как альтернативу широко применяемой на машиностроительных предприятиях химико-термической обработки, в первую очередь цементации. При этом при равных, а по некоторым показателям более высоких прочностных и эксплуатационных свойствах, обеспечивает значительный экономический эффект за счет трех составляющих — материала, технологии и оборудования.

На рис. 4 показана стоимость стали 60ПП по данным интернет-источников по состоянию на 2009 г. в сравнении с некоторыми сталями, используемыми при ХТО. Как видно на диаграмме, особенно значительна разница в стоимости для никелесодержащих сталей, которые применяются для широкого спектра высоконагруженных деталей, например шестерен трансмиссии в автомобилестроении.

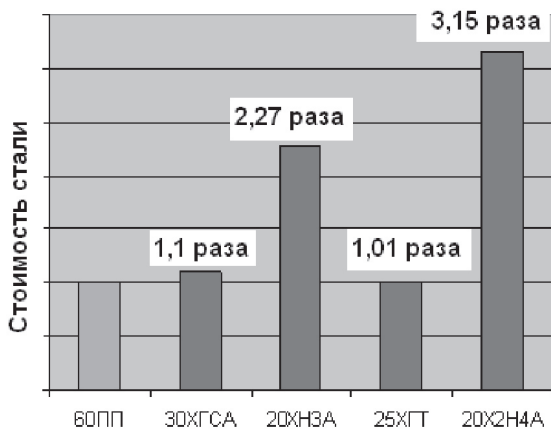


Рис. 5. Сравнительная стоимость стали 60ПП со сталями, применяемыми при ХТО

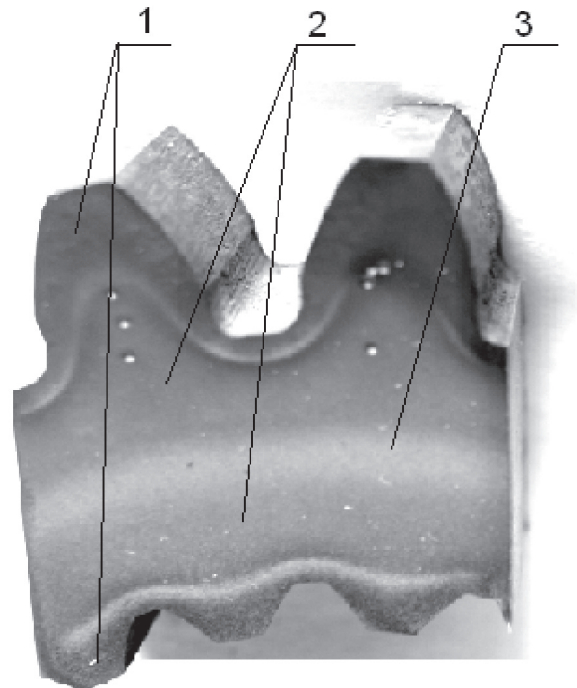


Рис. 4. Распределение зон упрочнения при контурной объемно-поверхностной закалке детали из стали ПП:
 1 — зона закалки; 2 — зона промежуточных превращений; 3 — зона основного металла

Контурная объемно-поверхностная закалка сталей пониженной прокаливаемости по сравнению с химико-термической обработкой обеспечивает значительный экономический эффект по энергоресурсам. Цикл термообработки сокращается с десятков часов до нескольких минут, затраты электроэнергии уменьшаются в 10–12 раз, исключается потребление природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов, выбросы вредных испарений, дыма, сажи, тепла и газов в окружающую среду.

Стоимость оборудования для ОПЗ сравнима со стоимостью индукционной установки, что в 8–12 раз дешевле оборудования для ХТО. При этом занимая площадь оборудования в несколько раз меньше.

Процесс равномерного сквозного индукционного нагрева зубчатых деталей

Для выполнения контурной объемно-поверхностной закалки необходимо выполнение двух условий — равномерный сквозной индукционный нагрев и интенсивное со скоростями более 1000 °C/с равномерное закалочное охлаждение. Зубчатые детали имеют сложную

форму и обеспечить их равномерный нагрев традиционным способом путем равномерного распространения температуры в радиальном направлении от поверхности к сердцевине детали представляется сложным. Было предложено и исследовано влияние нескольких типов электромагнитных полей на распределение температуры по поверхности и сечению детали. На рис. 5 представлены схемы сквозного индукционного нагрева различных зубчатых деталей.

Детали с цилиндрическими зубчатыми поверхностями подвергали сквозному индукционному нагреву в продольном электромагнитном поле с дифференцированным распределением плотности по длине. При равномерной плотности электромагнитного поля для данного типа заготовок происходит подстуживание заготовки по ее торцам за счет влияния краевых эффектов, что приводит к недогреву. Закалка деталей, нагретых в электромагнитном поле такого типа, приводит к неравномерной твердости и различной микро-

структуре по различным сечениям зуба и детали. На рис. 6, а показана микроструктура закаленного слоя ОПЗ слоя по контуру зуба — мартенсит мелкоигольчатый, твердость ОПЗ-слоя по контуру зуба 61–59 HRC, на глубине 1,0–1,5 — 58–57 HRC; на рис. 6, б троостомартенсит + участки феррита, твердость ОПЗ-слоя по контуру 51–52 HRC, на глубине 1,5 мм — 49–50 HRC.

Для обеспечения равномерности нагрева было произведено перераспределение плотности электромагнитного поля за счет изменения ширины индукционных витков индуктора.

На рис. 7, а показан процесс сквозного индукционного нагрева цилиндрической зубчатой детали в многовитковом индукторе с дифференцированным распределением электромагнитного поля, а на рис. 7, б — распределение температуры по поверхности детали после завершения процесса нагрева в подобном электромагнитном поле, измеренное с помощью стационарного оптического пирометра «Raytek».

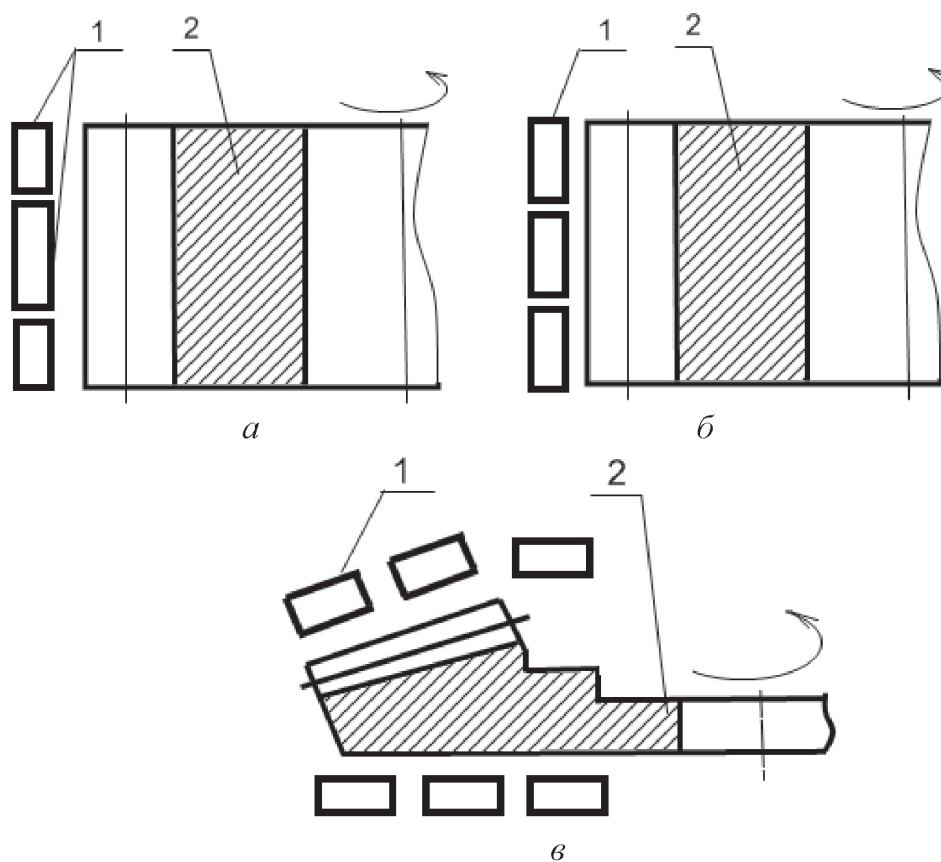
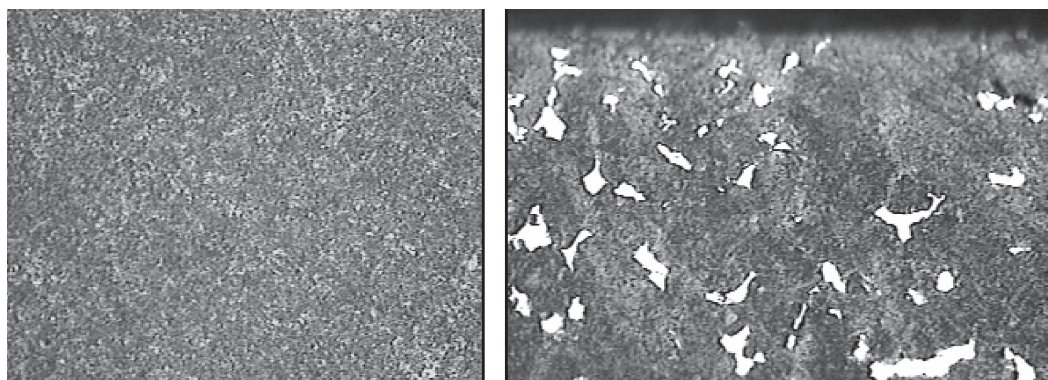


Рис. 6. Схемы индукционного нагрева зубчатых деталей различными типами электромагнитного поля: а — продольное неравномерное; б — продольное равномерное; в — ассиметричное:

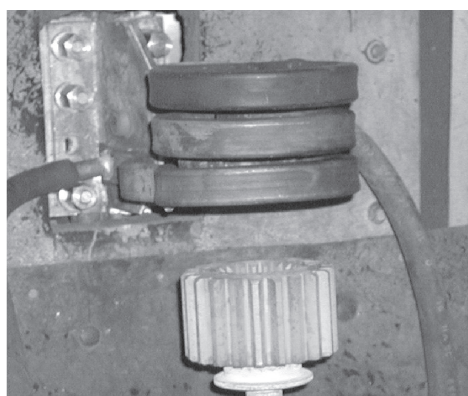
1 — индукционный виток индуктора; 2 — нагреваемая деталь



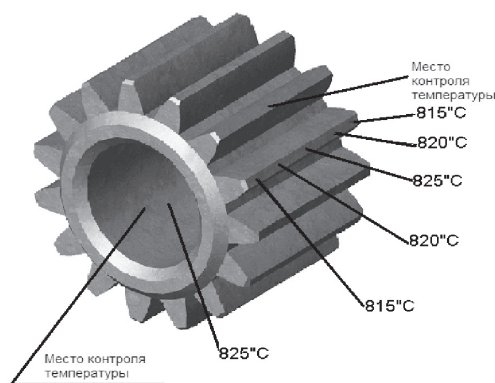
а

б

*Рис. 7. Микроструктура ОПЗ-слоя по контуру зуба детали шестерня ведущая 5440-2405028 после нагрева в продольном равномерном электромагнитном поле:
а — на расстоянии 30 мм от торца детали; б — на расстоянии 5 мм от торца детали*



а



б

*Рис. 8. Процесс сквозного индукционного нагрева цилиндрических зубчатых деталей:
а — процесс нагрева; б — распределение температуры по поверхности*

Распределение температуры по сечению определялось с помощью хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных на впадине зуба, теле зуба, внутренней поверхности детали при различных значениях удельной мощности нагрева от 6 до 18 кВт/кг.

На рис. 9, *а* представлен график изменения температуры нагрева детали сателлит колесной передачи по трем точкам измерения при удельной мощности нагрева 10 кВт/кг. Скорость нагрева при этом составляла для тела зуба 4,4 °С/с, для впадины зуба 4,13 °С/с, для внутренней поверхности 4,08 °С/с. Такое малое различие в скоростях нагрева для впадины и внутренней поверхности объясняется малой толщиной детали в данном сечении, что за счет теплопроводности практически уравнивает скорости нагрева по данным измеряе-

мым точкам. При этом максимальная разница в температуре нагрева по измеряемым точкам составила не более 30–40 °С.

На рис. 9, *б* представлен график изменения температуры нагрева шестерни колесной передачи по трем точкам: впадине зуба, теле зуба, внутренней шлицевой поверхности детали при удельной мощности нагрева 10 кВт/кг. Скорость нагрева для данной детали составляла для тела зуба 4,48 °С/с, для впадины 4,13 °С/с, для внутреннего шлица 3,85 °С/с. Расстояние между впадиной зуба и внутренним шлицем для шестерни 5336-2405028 в 3,4 раза больше, чем для сателлита, поэтому разница в нагреве этих поверхностей видна довольно четко. Разница в температуре нагрева по измеряемым точкам на разных стадиях составляла до 95 °С.

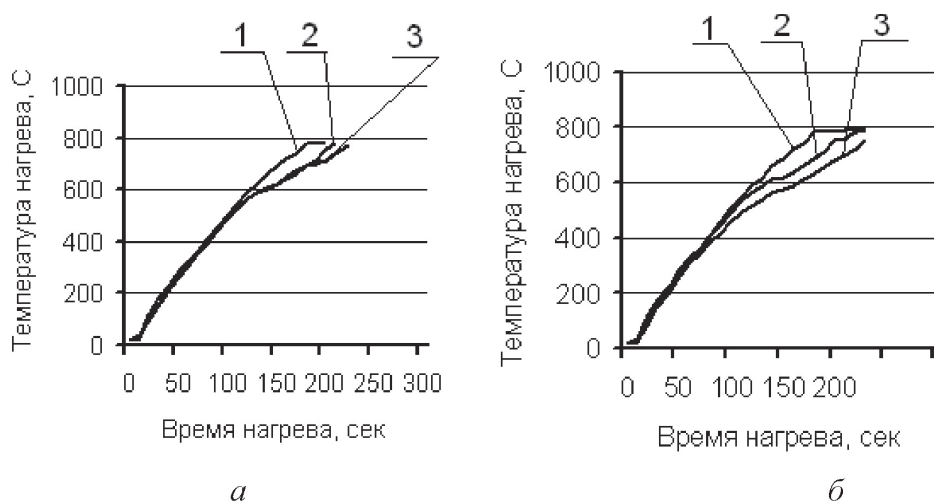


Рис. 9. График изменения температуры нагрева по трем точкам измерения для шестерен колесной передачи заднего моста:

1 — впадина зуба; 2 — тело зуба; 3 — внутренняя поверхность:
а — сателлит; б — шестерня

В табл. 1 представлены данные измерения температуры нагрева шестерни 5336-2405028 при различных значениях удельной мощности нагрева.

Вторым типом электромагнитного поля, которое было применено для нагрева деталей, является асимметричное электромагнитное поле. Внешний вид нагрева деталей в таком поле показан на рис. 10. В электромагнитном поле нагревали детали сложной формы, такие как крестовина дифференциала, конические шестерни главной передачи и сателлиты межколесного дифференциала. Отличительной особенностью этого типа нагрева является высокая частота импульсов воздействия электромагнитного поля на нагреваемую деталь, что связано с двумя факторами — геометрическими размерами асимметричного индуктора и частоты вращения детали в индукторе. При этом достигаемая разница в температуре нагрева

для данного типа электромагнитного поля составляла 15–25 °С как по поверхности, так и по сечению детали.

Таким образом, для обеспечения равномерного с точностью ± 15 °С сквозного нагрева деталей с различными типами зубчатых поверхностей под последующую объемно-поверхностную закалку по контуру требуется соблюдение двух условий.

1. Правильный выбор типа индукционного нагрева, определяемый типом электромагнитного поля, который должен обеспечивать равномерность распределения температуры по поверхности детали ± 20 °С.

2. Выбор величины удельной мощности нагрева, которая не должна превышать значений нагрева не более 6 кВт/кг, что соответствует скоростям нагрева 3–5 °С/с и обеспечивает градиент конечной температуры по сечению ≤ 20 °С.

Таблица 1

Разница в температурах нагрева тела шестерни и зуба шестерни при различных значениях удельной мощности нагрева зуба

Максимальная разница температуры нагрева шестерни измеренная в интервале		Температура тела зуба, °С/с					
		300	400	500	600	700	800
Удельная мощность нагрева, кВт/кг	6	30	35	45	50	45	35
	10	60	65	75	90	70	45
	14	80	130	150	200	195	140
	18	95	175	240	370	310	230

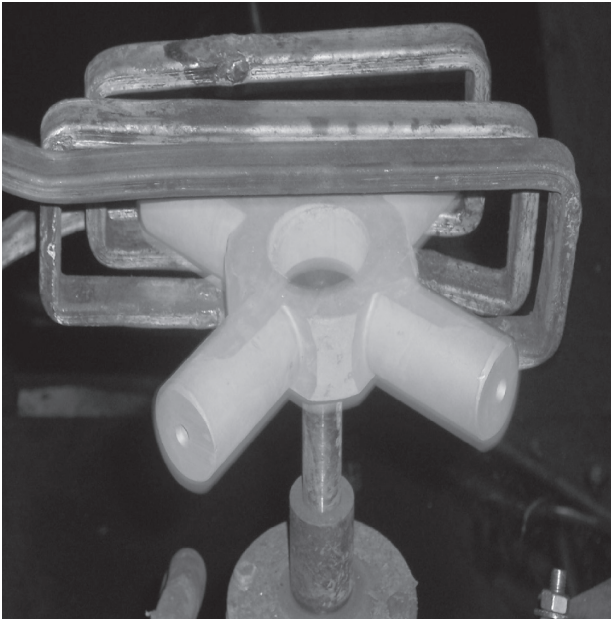


Рис. 10. Сквозной индукционный нагрев крестовина межколесного дифференциала ведущего мостов из стали пониженной прокаливаемости 60 ПП в асимметричном электромагнитном поле

Процесс равномерного закалочного охлаждения по контуру при объемно-поверхностной закалке детали из стали пониженной прокаливаемости

Был разработан и опробован способ интенсивного закалочного охлаждения зубчатых деталей ведущих мостов мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости, заключающийся в комбинированном применении двух типов охлаждения поверхности. Суть разработанного способа заключается в том, что наружные зубчатые поверхности детали охлаждаются спрейерным типом охлаждения, а внутренние поверхности простой формы охлаждением потоком движущейся закалочной среды. Схема предложенного способа охлаждения показана на рис. 11. Закачиваемое изделие 1 после сквозного индукционного нагрева помещается в закалочную камеру, где производится интенсивное закалочное охлаждение для наружных и торцовых поверхностей через систему спрейеров 2, а для внутренних поверхностей путем быстродвижущегося потока 3 охлаждающей среды вдоль закачиваемой поверхности. При этом за счет применения в конструкции закалочной камеры специальных разделительных стенок достигается разделение потоков спрейерного охлаждения и охлаждения потоком.

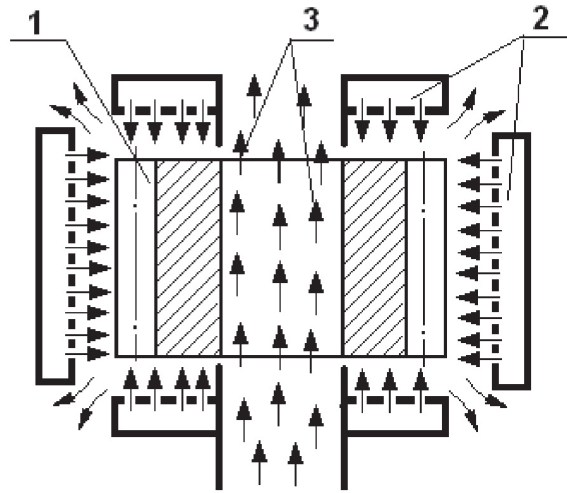


Рис. 11. Схема комбинированного закалочного охлаждения по контуру зубчатых деталей из сталей пониженной прокаливаемости: 1 — закачиваемая деталь; 2 — спрейерная система; 3 — охлаждающий поток

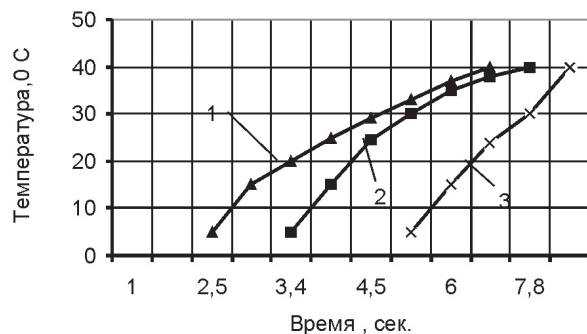


Рис. 12. Зависимость оптимальной длительности периода закалочного охлаждения от температуры и давления закалочной оборотной воды в подающей системе при давлении среды:

1 — 1 кгс/см², 2 — 2 кгс/см², 3 — 5 кгс/см²

Дальнейшие работы по отладке режимов закалочного охлаждения проводили по двум направлениям — путем закалки опытных партий деталей на специальном закалочном приспособлении и методом математического моделирования.

При упрочнении опытных партий для закалочного охлаждения использовали техническую воду оборотной системы Минского автозавода. В процессе исследования давление в оборотной системе изменяли от 1 до 5 кгс/см², температуру от 5 до 30 °С. При меньшем давлении охлаждающей воды не обеспечивает непрерывности

потока, подаваемого на закаливаемую поверхность, а для получения давления более 5 кгс/см^2 необходимо применение специальных насосов высокого давления. Применяемые интервалы изменения температуры закалочной воды выбирались из данных изменения температуры закалочной воды в системе обратного водоснабжения.

Расход закалочной воды — 20–30 л/с выбирался из расчета суммарного сечения калиброванных отверстий закалочного приспособления для данных конкретных деталей. При оптимальных режимах охлаждения достигается равномерная твердость поверхности 60–62 HRC с мартенситной структурой закаленного слоя. Деформация делительного диаметра зубьев при этом не превышает 0,02 мм, закалочные трещины отсутствуют. Закалка шестерен по традиционному режиму обеспечивая твердость 45–64 HRC для различных сочетаний температуры и давления закалочной воды, приводит к образованию мягких трооститных пятен (для теплой воды малого давления) или закалочных трещин (для холодной воды большого давления).

Для определения оптимальной длительности охлаждения выполнены работы по математическому моделированию процессов охлаждения деталей из стали 60ПП с помощью программного продукта «ThermoSim2». Для деталей межколесного дифференциала

сателлит и полуосевая шестерня было смоделировано охлаждение при различной длительности 1,0, 5,0 и 8,0 с. При этом рассчитывалось распределение температуры по сечению детали. На рис. 13, а, б представлено графическое изображение распределения температуры по сечению детали при длительности охлаждения: а — 1,0 с; б — 5,0 с.

Из анализа полученных результатов установлено, что длительность охлаждения для данной детали из стали 60ПП должна составлять не менее 5 с, т. к. видно, что при длительности охлаждения 5,0 с внутри детали находится слой металла при значительной температуре. Прекращение охлаждения приведет к самоотпуску детали на значительную температуру, что неизбежно снизит твердость поверхности. Кроме того, в процессе охлаждения данной детали формируется высокий градиент температуры по сечению, составляющий величину от $629 \text{ }^\circ\text{C}$ при 1,0 с охлаждения и $350 \text{ }^\circ\text{C}$ при 5,0 соответственно. Это неизбежно приведет к повышенному короблению детали в процессе закалки.

Таким образом, предложен и исследован способ комбинированного интенсивного закалочного охлаждения зубчатых деталей ведущих мостов мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости, обеспечивающий достижения равномерной твердости по контуру детали в интервале 60–62 HRC.

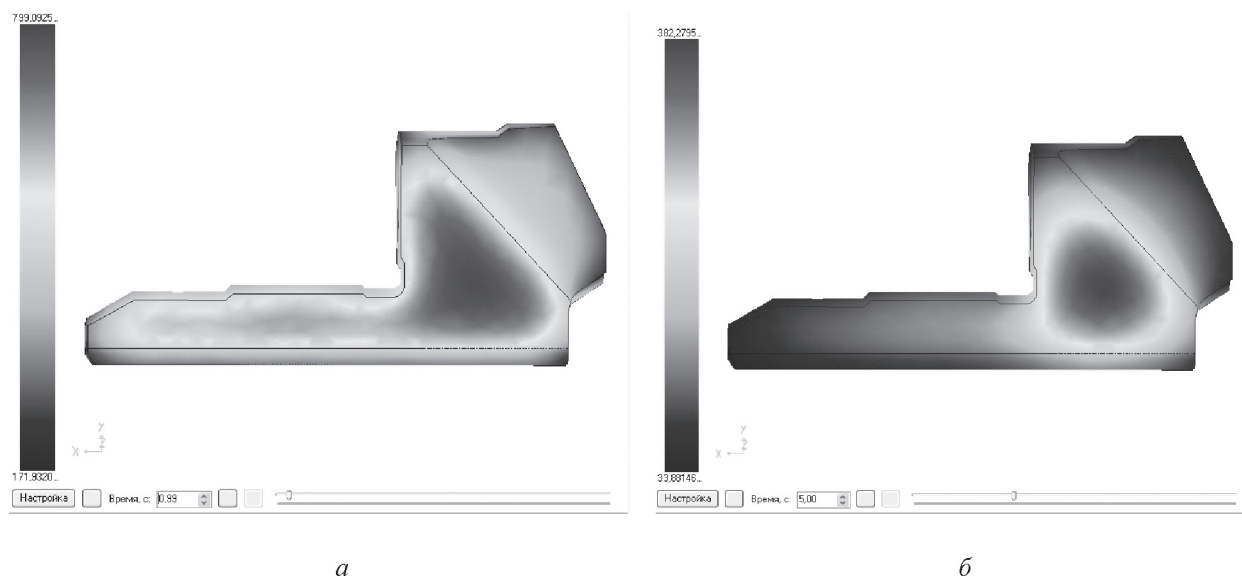


Рис. 13. Результаты математического моделирования деталей из стали 60ПП при интенсивном охлаждении длительностью: а — 1,0 с; б — 5,0 с

Результаты контурной объемно-поверхностной заковки различных зубчатых деталей заднего моста автомобиля из стали пониженной прокаливаемости

Была проведена контурная объемно-поверхностная заковка опытных партий цилиндрических и конических зубчатых колес и выполнено сравнение распределения упрочненных слоев по различным сечениям данных деталей с деталями из стали 20ХН3А, прошедшими цементацию.

На рис. 14 представлены фотографии макрошлифов детали сателлит с наружной зубчатой поверхностью, упрочненных химико-термической и контурной объемно-поверхностной заковкой.

На рис. 15 показан внешний вид распределение зоны упрочнения на конических прямозубых шестернях межколесного дифференциала заднего моста автомобиля МАЗ по различным сечениям.

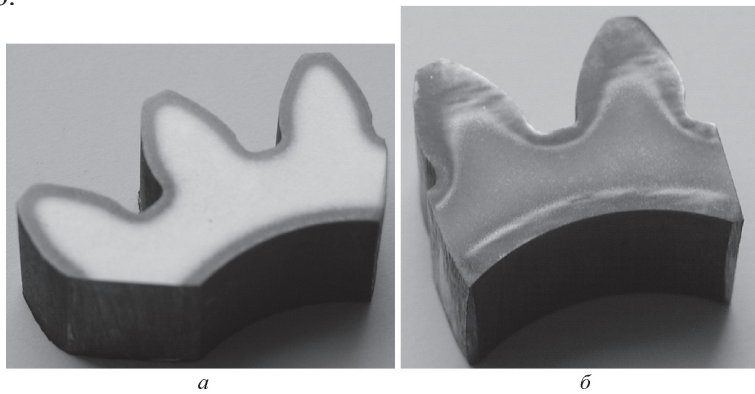


Рис. 14. Фотографии макрошлифов наружной прямозубой шестерни:
а — из стали 20ХН3А, прошедшей операцию цементации; б — из стали 60ПП с ОПЗ по контуру

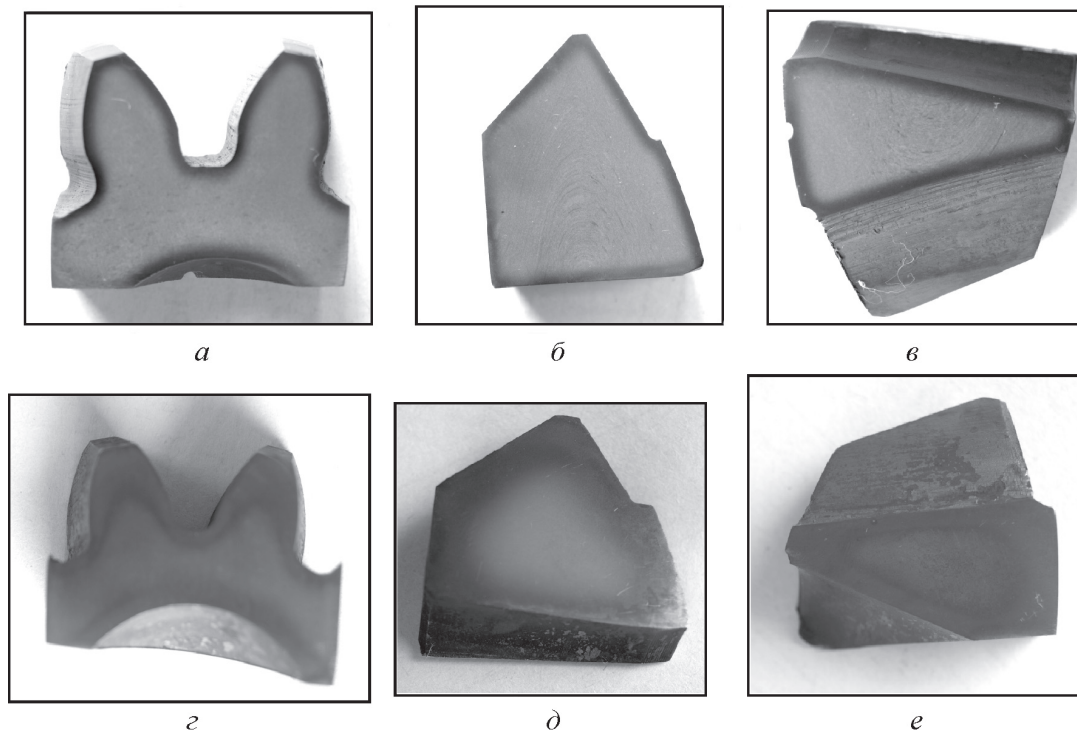


Рис. 15. Распределение зоны упрочнения на детали сателлит межколесного дифференциала:
а, б, в — сталь 20ХН3А и цементация; г, д, е — сталь 60 ПП и ОПЗ;
а, г — поперечное сечение шестерни по середине высоты зуба; б, д — продольное сечение вершину зуба;
в, е — продольное сечение через впадину зуба

Было установлено, что интенсивное охлаждение деталей из стали 60 ПП по контуру обеспечивает равномерное распределение твердости в интервале 58–64 HRC по всей поверхности сложнопрофильных деталей. Контурная объемно-поверхностная закалка деталей из стали 60ПП обеспечивает глубину закаленного слоя в 2,0–2,5 раза большую, чем при химико-термической обработке стали 20ХНЗА как на зубчатых поверхностях, так и по всей поверхности детали. Работы проводили на детали сателлит колесной передачи. Были проведены измерения твердости на трех зу-

бьях, находящихся по отношению друг к другу под углом 120° и по торцу сателлита из стали 60 ПП после объемно-поверхностной закалки и отпуска на температуру 180 °С. На рис. 12 показана схема измерений твердости. Результаты измерений сведены в табл. № 2.

Распределение твердости по различным сечениям проводили на цилиндрических и конических зубчатых деталях.

На рис. 17 показано распределение твердости от поверхности по глубине для различных сечений детали сателлит и ее зубчатой поверхности.

Таблица 2

Результаты измерения твердости на детали сателлит 5551-2405035, изготовленного из стали 60ПП и упрочненного ОПЗ

Номер точки замера	Твердость поверхности в месте измерения, HRC			
	зуб № 1	зуб № 2	зуб № 3	
1	59,0	59,0	58,5	торец Верхний 60–61
2	59,0	60,0	59,0	
3	60,5	61,0	59,0	
4	60,0	61,0	59,0	
5	60,5	61,0	59,0	Нижний 59–60
6	60,5	60,0	59,5	
7	59,0	60,5	59,5	
8	60,0	60,5	59,0	
9	59,0	59,0	59,0	
10	58,0	59,0	58,5	

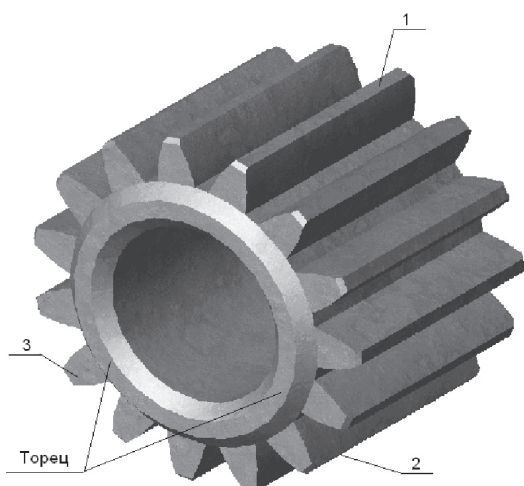


Рис. 16. Места замера твердости на детали сателлит 5551-2405035, изготовленного из стали 60ПП и упрочненного ОПЗ

Из приведенных графиков видно, что в зависимости от условий охлаждения глубина упрочненного слоя различна, но твердость поверхности по всем измеряемым сечениям находится в интервале >60 HRC.

На конических зубчатых колесах проведено сравнительное исследование распределения твердости по различным сечениям детали (рис. 14). Исследованиями установлено, что для конических прямозубых поверхностей деталей, изготовленных из стали 60ПП и упрочненных ОПЗ по контуру, в сравнении с аналогичными деталями из стали 20ХНЗА, подвергнутыми цементации, твердость поверхности равнозначна, а для некоторых более высокая. Глубина упрочненного слоя составляет от 2 до 4 мм, что в 1,5–2,0 раза больше, а твердость сердцевины на 2–6 единиц HRC ниже.

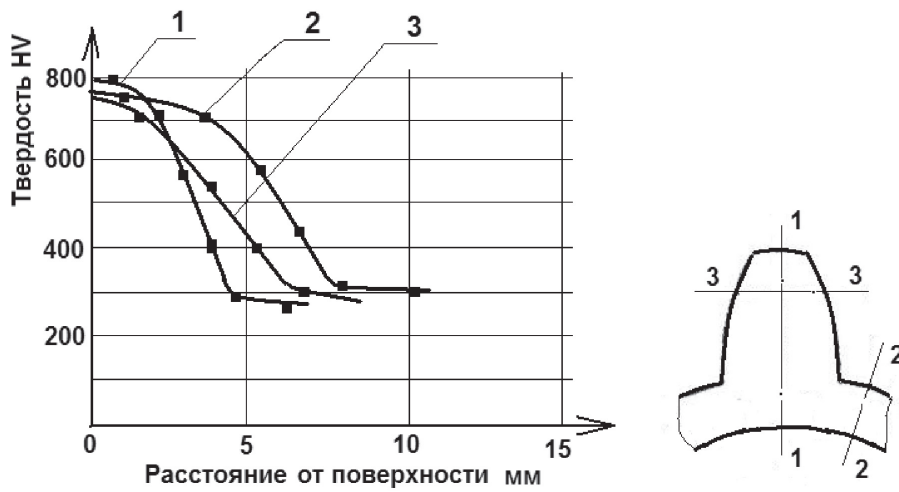
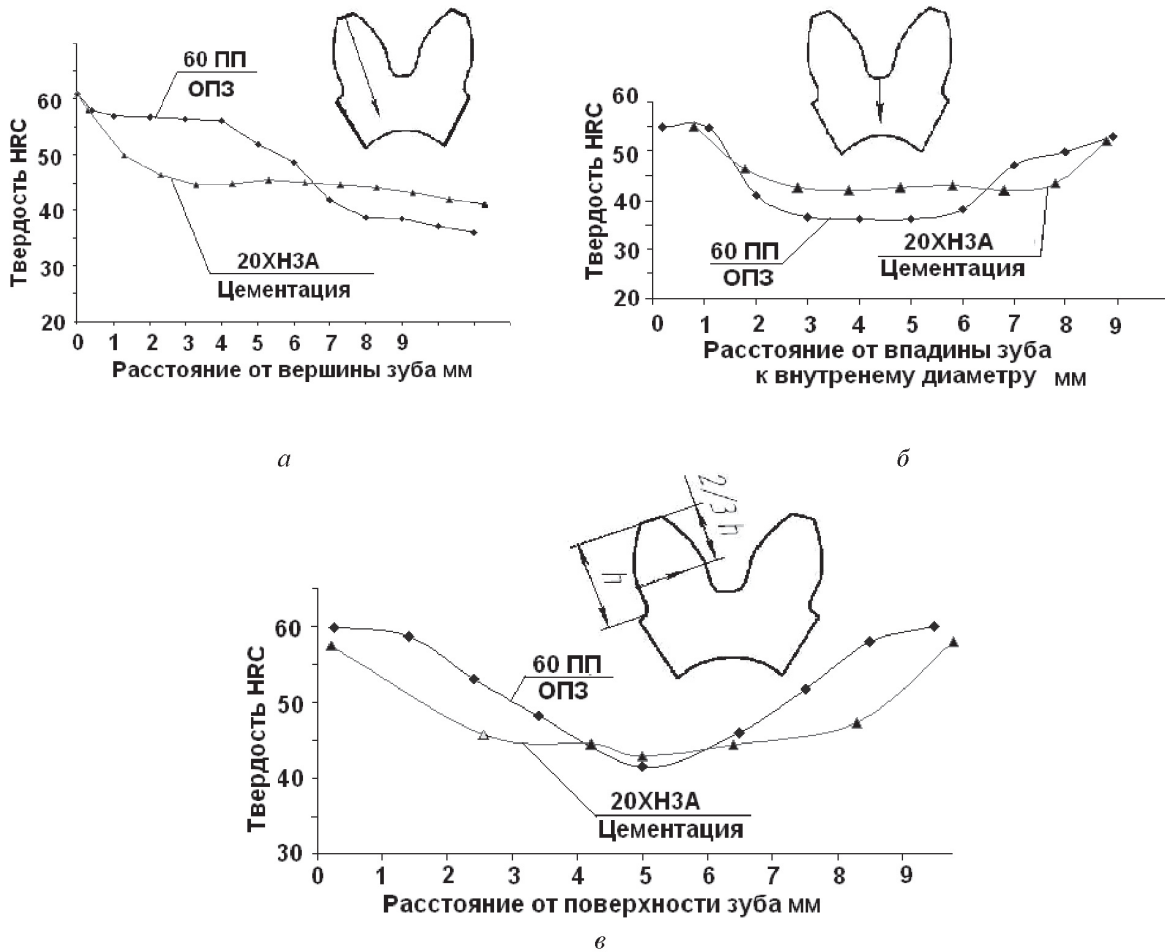


Рис. 17. Распределение твердости по сечениям сателлита 5336-2405035:

1-1 — от вершины зуба до внутреннего диаметра; 2-2 — от впадины зубчатой поверхности до внутреннего диаметра; 3-3 — перпендикулярно боковой поверхности зуба на расстоянии $2/3$ от диаметра впадин



Рису. 18. Распределение твердости по различным сечениям конической прямозубой зубчатой поверхности: а — по вершине зуба; б — по впадине зуба; в — по боковой поверхности на расстоянии $2/3$ от вершины

Выводы

Разработан и исследован способ контурного объемно-поверхностного охлаждения зубчатых деталей из сталей пониженной прокаливаемости, обеспечивающий при нагреве деталей сложной формы из сталей ПП с удельными мощностями не более 10 кВт/кг

и скоростями нагрева 4–8 °С/с и градиентом конечной температуры по сечению ≤ 20 °С обеспечивается при равномерном дозированном с точностью до $\pm 0,1$ с охлаждении со скоростями ≥ 1000 °С/с, твердость поверхности по всему контуру детали в интервале 58–63 HRC.

Литература

1. Шепеляковский, К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве / К.З. Шепеляковский. — М.: Машиностроение, 1972.
2. Лемзиков, А.В. Программный комплекс «THERMOSIM 2» для моделирования процессов индукционной закалки / А.В. Лемзиков, Д.Г. Иванов // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2008 г.
3. Устройство для управляемой закалки деталей из сталей пониженной прокаливаемости: пат. 2374 Респ. Беларусь на полезную модель / В.А. Гуринович, А.П. Ракомсин, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, Н.С. Карпушкин, И.М. Гуринович, С.А. Позняк, А.Н. Климкович.
4. Способ управляемого закалочного охлаждения стальных изделий: пат. 7184 Респ. Беларусь на изобретение / А.П. Ракомсин, И.С. Гаухштейн, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк.
5. Михлюк, А.И. Перспективы применения сталей пониженной прокаливаемости для изготовления деталей автомобилей МАЗ / А.И. Михлюк // Вести НАНБ. Сер. Физ.-техн. наук. — 2008. — № 2. — С. 65–72.

УДК 629.621.9.079

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЕДОМОЙ ШЕСТЕРНИ ЗАДНЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЕЙ СЕМЕЙСТВА МАЗ

к. т. н. М.И. Сидоренко, Ю.А. Казленко, доц. В.А. Бакин

Технический прогресс в автомобилестроении характеризуется не только улучшением конструкции машин, но и непрерывным совершенствованием технологии их производства.

Очень важно качественно, дешево и в заданные сроки с минимальными затратами изготовить автомобиль, применяя высокопроизводительное оборудование. От того, какая принята технология производства, во многом зависит надежность работы выпускаемых машин.

С целью повышения качества, надежности и долговечности деталей, экономии материальных

ресурсов и снижения трудоемкости на ОАО «МАЗ» внедрена комплексная технология обработки детали планетарной колесной передачи автомобилей семейства МАЗ — шестерни ведомой.

Колесная передача (рис. 1) представляет собой планетарный редуктор, состоящий из прямозубых цилиндрических шестерен с внешним и внутренним зацеплением.

Ведомая шестерня 3 внутреннего зацепления посредством ступицы 4 установлена на шлицевом конце цапфы картера и удерживается от осевого перемещения гайками.

Ведомая шестерня является одной из важных составных частей планетарной колесной передачи заднего моста автомобиля и служит для передачи вращения от сателлитов 2 на ступицу 4.

Условия работы колесной планетарной передачи предусматривают постоянное статическое зацепление ведомой шестерни со ступицей 4. В процессе эксплуатации автомобиля ведомая шестерня подвергается значительным знакопеременным нагрузкам, поэтому при изготовлении шестерни ведомой необходимо обеспечить высокое качество, от которого зависит работа транспортного средства в целом.

Применяемая ранее технология изготовления ведомой шестерни была весьма затратной, т. к. зубодолбление одной детали выполнялось за 100 мин и для выполнения заданной программы приходилось использовать 24 зубодолбежных станка модели КС3-62, кроме того предварительная механическая обработка осуществлялась на 4 токарных станках модели 1283 и одного торце-круглошлифовального станка модели ЗТ160. Планировка участка представлена на рис. 2.

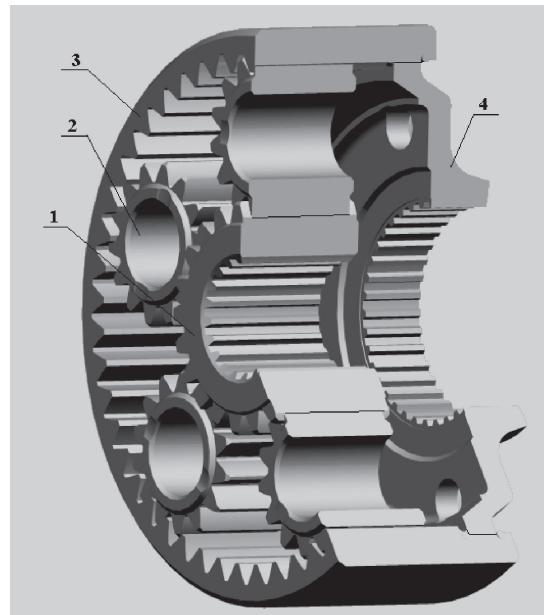


Рис. 1. Планетарная колесная передача автомобиля МАЗ:

- 1 — ведущая шестерня; 2 — сателлит;
3 — ведомая шестерня; 4 — ступица

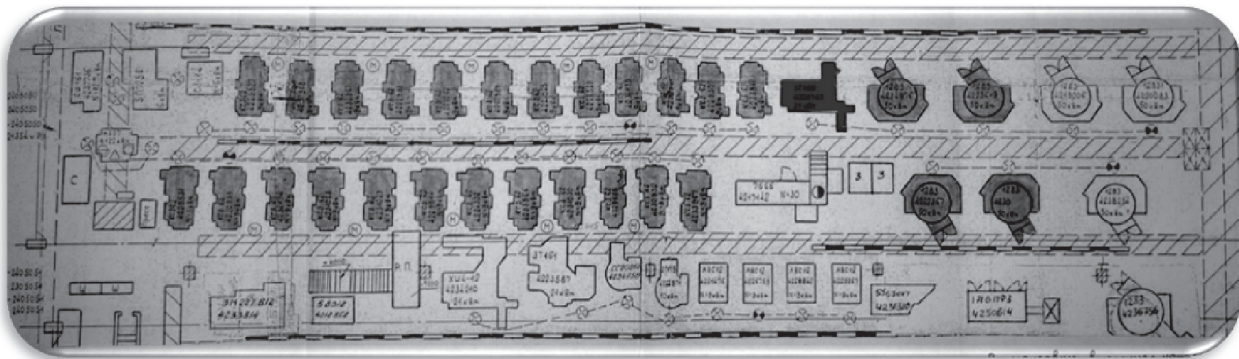


Рис. 2. Планировка участка

Однако при обеспечении заданного качества изготовления детали, старая технология обладала рядом недостатков, самым значительным из которых являлась длительность процесса зубодолбления и в связи с этим использование очень большого количества оборудования, производственных площадей и рабочего персонала.

После внедрения новой комплексной технологии вместо 4 токарных и одного торце-круглошлифовального станка используется один токарный 2-шпиндельный станок с ЧПУ модели UNIVERTOR AM2 (Германия) (рис. 3).

Токарная обработка шестерни ведомой на этом станке производится следующим образом.

Поковки посредством подающего транспортного конвейера (рис. 4) поступают на первый ка-

нал станка (рис. 5). Роль манипуляторов на данном станке выполняют шпиндели. На первом канале заготовка проходит первый этап обработки, по окончании которой с помощью измерительного щупа производится измерение размеров обработанных поверхностей и при необходимости во избежание выпуска бракованной продукции дает команду для требуемой корректировки.

Затем шпиндель-манипулятор перемещает деталь в контрователь (рис. 6) для точения изделия с обратной стороны на втором канале.

На данной позиции заготовка проходит окончательную токарную обработку. После этого заготовка контролируется и шпиндель-манипулятор второго канала укладывает ее на выходной транспортный конвейер, по которому она попада-



Рис. 3. Токарный 2-шпиндельный станок с ЧПУ модели UNIVERTOR AM2 (Германия)

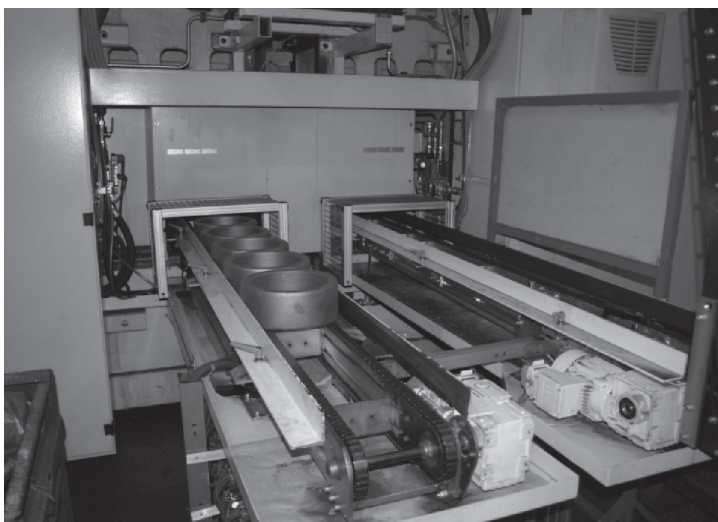


Рис. 4. Подающий транспортный конвейер станка

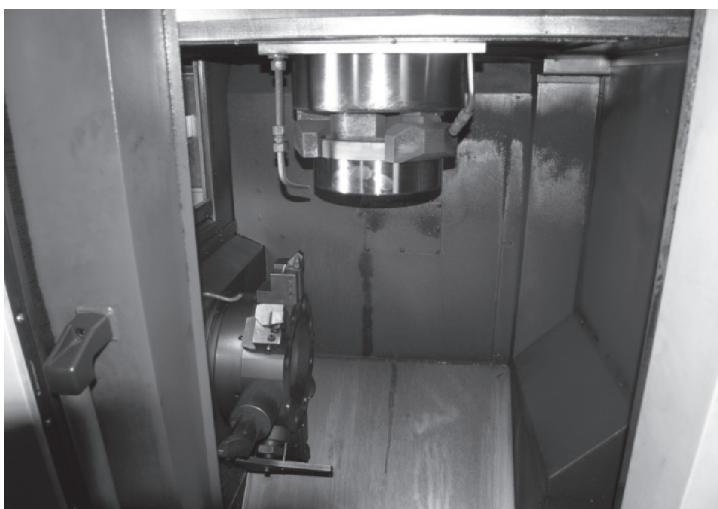


Рис. 5. Первый канал обработки

ет на следующую зубообрабатывающую операцию.

Следует отметить, что точение осуществляется прогрессивными режущими инструментами производства компании «Sandvik Coromant» (Королевство Швеция). Использование указанного инструмента позволяет производить обработку на высоких режимах резания. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости используется 5 %-ная эмульсия на основе концентрата Виттол-297 (производитель — ООО «Сервит» г. Минск). Система автоматического контроля размеров обработанных поверхностей практически полностью исключает выпуск бракованных деталей.

Обработка внутреннего зубчатого венца производится двумя методами: зубопротягиванием и высокоскоростным зубодолблением.

Для зубопротягивания шестерни по конвейеру поступают в распределительный шкаф вертикально-протяжного станка модели RISH-M (производства фирмы «Клинк», Германия) (рис. 7), затем на подвижный стол для подъема и зубопротягивания.

Для фиксации обрабатываемого изделия используется гидравлическое зажимное приспособление, которое расположено на указанном выше столе.

Стол с зажатым в приспособлении изделием перемещается к оси протягивания. Протяжка (рис. 8) передним направлением входит в деталь и фиксируется.

Стол с протягиваемой деталью с помощью рабочих салазок поднимается вверх вдоль протяжки и осуществляется процесс протягивания внутренних зубьев. По окончании протягивания подъемный стол продолжает подниматься до тех пор, пока изделие не выйдет из зоны протягивания. Затем деталь сдвигается с оси протягивания в положение «обратного хода». Стол опускается вниз, в это время специальное приспособление, установленное на нем, производит очистку протяжки от стружки.

Шестерня сдвигается с приспособления и на ее место поступает новая заготовка.

Обработанная деталь в закрытой камере проходит очистку воздухом от масла

HOUGHTON Cutmax D 960-4E, используемого в качестве охлаждения в процессе протягивания, и по транспортному конвейеру (рис. 9) отправляется в точку контроля.

Цикл обработки на данном станке составляет 2,4 мин. Общая стойкость протяжки (с учетом переточек) — около 27000 деталей.

Следует отметить, что данный станок позволяет обрабатывать зубчатые колеса с косыми зубьями внутреннего зацепления.

Часть заготовок проходит обработку зубчатого венца на зубодолбежных станках фирмы «LIEBHERR».

Высокопроизводительные зубодолбежные станки фирмы «LIEBHERR» модель LFS 300 (рис. 10), применяемые для получения внутреннего зуба в шестерни ведомой, позволяют осуществлять обработку с очень высокими скоростями резания, обеспечивая при этом необходимое качество и высокую производительность.

Управление станком осуществляется компьютерными программами с помощью системы управления «Siemens 840D».

Перед началом работы после включения станка при необходимости производится смена инструмента (долбьяка), который монтируется на держателе долбьяка, который в свою очередь зажимается в долбежном шпинделе (зажим осуществляется при помощи ножной педали). Далее производится установка и зажим заготовки на поворотном рабочем столе станка (рис. 11).

Затем осуществляется выбор программы, ввод необходимых данных о детали и инструменте. После полученной информации, необходимой коррекции, система ЧПУ дает команду на выполнение рабочего цикла. Обработка за счет согласованного движения обката инструмента и заготовки осуществляется за три прохода на высокой скорости резания (до 60 м/мин).

Процесс зубодолбления происходит с обильным охлаждением, в качестве которого используется масло (Emol-O-HON 925/2, Германия), в результате чего снижается температура в зоне резания, что

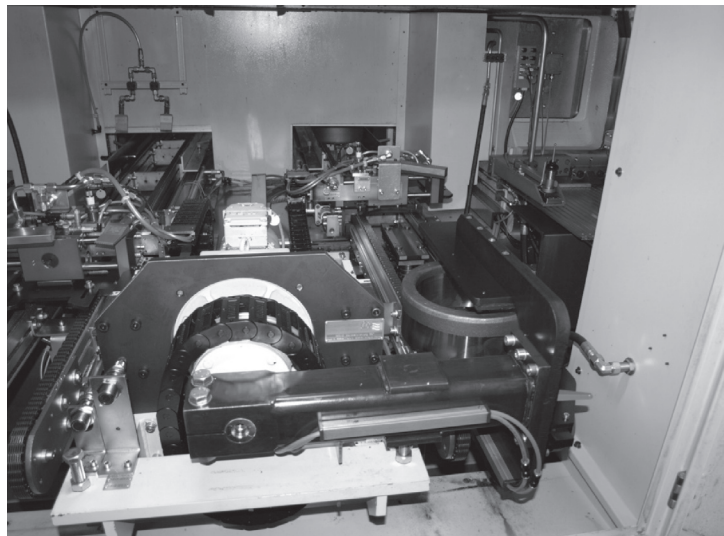


Рис. 6. Контователь детали

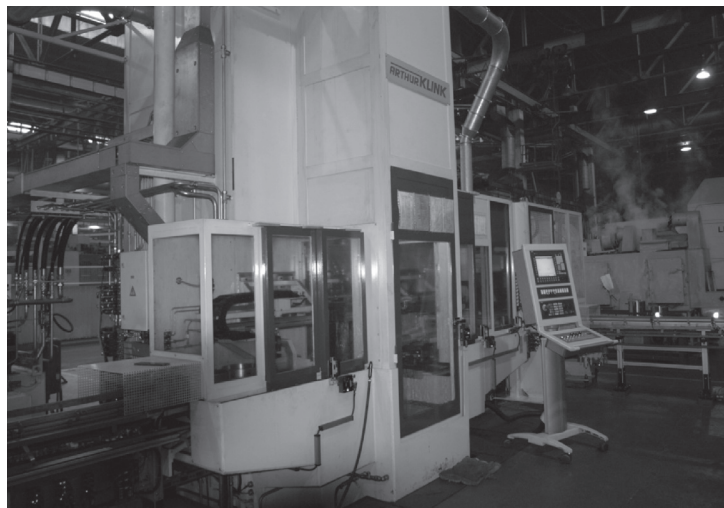


Рис. 7. Вертикально-протяжной станок модели RISH-M (Германия)

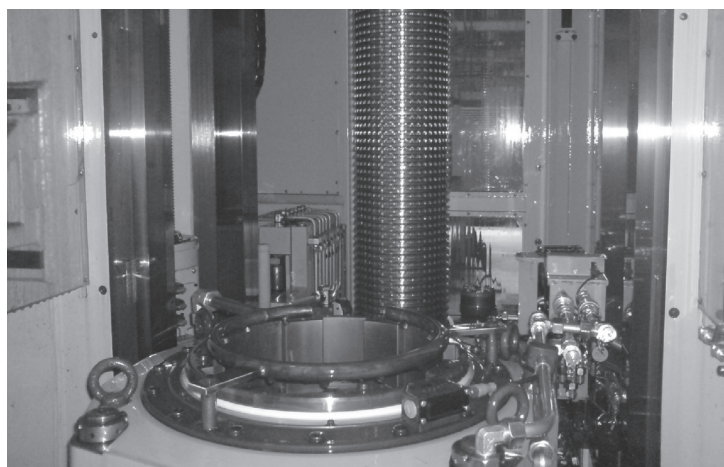


Рис. 8. Протяжка, используемая при обработке шестерни ведомой

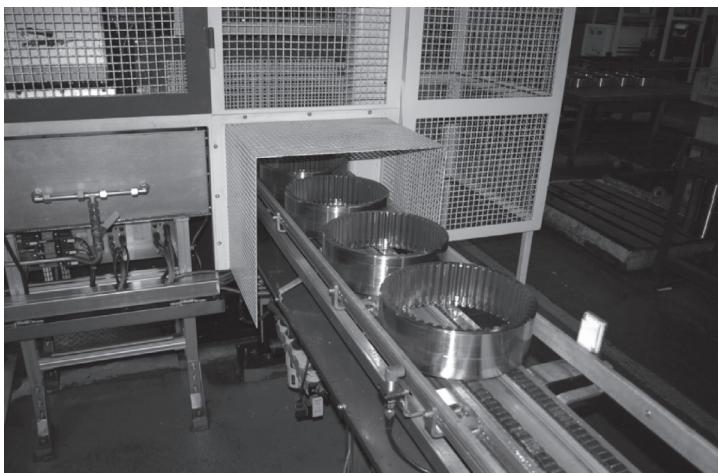


Рис. 9. Транспортный конвейер протяжного станка



Рис. 10. Зубодолбежный станок фирмы «LIEBHERR» модель LFS 300

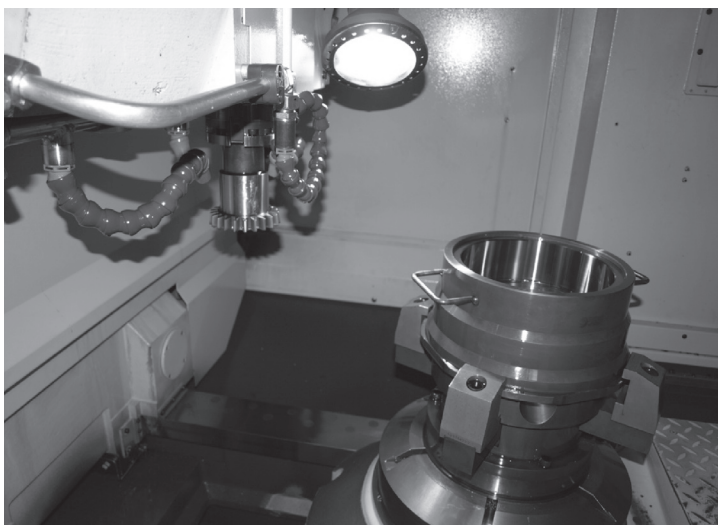


Рис. 11. Рабочая зона зубодолбежного станка

увеличивает стойкость режущего инструмента и его долговечность, улучшается качество обработки, а также осуществляется смыв стружки с последующим ее удалением при помощи конвейера в специальную тару. При этом стойкость долбяков до первой переточки составляет около 25 деталей. Весь процесс зубодобления детали осуществляется за 24 мин.

После обработки происходит контроль детали, снятие ее со станка и установка новой заготовки. Затем цикл повторяется. При необходимости осуществляется корректирование размеров детали по мере износа режущего инструмента.

По разработанной технологии предусмотрена замена малопродуктивного метода зубодобления на перспективные методы: зубопротягивание и высокоскоростное долбление. При изготовлении зубчатого венца с внутренним зацеплением используется протяжка, позволяющая осуществить полную обработку зубьев детали за один рабочий ход.

Применение долбяков немецкой фирмы «LIEBHERR» на передовых зубообрабатывающих станках модели LFS 300 на высокой скорости резания с использованием новых смазочно-охлаждающих жидкостей позволили значительно повысить производительность обработки, уменьшить трудоемкость, улучшить качество обрабатываемых поверхностей, повысить точность получаемых размеров по сравнению с технологией, существовавшей ранее.

Внедрение новой комплексной технологии изготовления шестерни ведомой позволило высвободилось 523 м² производственных площадей, сократить 29 единиц оборудования, сэкономить 1609,9 тыс. кВт·ч электроэнергии и получить годовой экономический эффект около 320 млн руб. в год.

ЗНАМЕНИТЫЕ ЗЕМЛЯКИ В ИСТОРИИ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА

Б.Д. Долгатович, И.В. Качанов, А.Э. Павлович
Белорусский национальный технический университет

В 1829 г. на Черном море бриг «Меркурий» российского флота был атакован двумя линейными кораблями неприятеля, которые были значительно мощнее по габаритам и по вооружению. Благодаря мужеству команды брига в четырехчасовом бою противник вынужден был отступить, получив серьезные повреждения. Данное историческое событие вдохновило великого художника Ивана Константиновича Айвазовского, создавшего в 1892 г. замечательное произведение батальной живописи, фрагмент [1] которого представлен ниже.

Командовал геройским бригам наш земляк Александр Иванович Казарский, который родился 16 июня 1797 г. в местечке Дубровно Витебской губернии.

Самоотверженность, отличная выучка, дисциплина и смекалка сыграли решающую роль в этой удивительной победе.

Ей также способствовала оригинальная конструкция корпуса брига, который, получив множество повреждений, тем не менее оставался на плаву и продолжал неравный бой до победного конца.

18-пушечный бриг «Меркурий», построенный под руководством талантливого инженера-корабеля Ивана Яковлевича Осминина, являлся одним из первых боевых судов русского флота, чей корпус строился с применением наиболее прогрессивной по тому времени системы набора по методу Сепингса (с диагональными сваями-ридерсами). Систему эту ввел в 1817 г. знаменитый адмирал Алексей Самуилович Грейг на всех адмиралтействах Черноморского флота. Она повышала крепость корпуса, снижала спусковой перелом, уменьшала раскачку элементов.

Продолжателями славных традиций инженерной и научной мысли в области военного кораблестроения стали в последующие годы выдающиеся российские ученые — академик Крылов Алексей Николаевич и профессор Бубнов Иван Григорьевич, учеником и продолжателем дела ко-

торых был наш земляк, инженер-контр-адмирал Папкович Петр Федорович — один из создателей строительной механики корабля.

Папкович Петр Федорович родился 6 апреля 1887 г. в г. Бресте в семье инженера.

В 1911 г. с отличием окончил кораблестроительное отделение Петербургского политехнического института. В 1912 г. сдал экстерном экзамен по военно-морским дисциплинам и защитил проект военного корабля при Морском инженерном училище Императора Николая I. С 1916 г. — преподаватель в Политехническом институте.

В 1918 г. был назначен заведующим артиллерийским отделом технического бюро Адмиралтейского завода, одновременно читал лекции в Политехническом институте по строительной механике корабля, с 1920 г. — в Военно-морской академии.

В 1925 г. в СССР была принята программа создания кораблей собственных типов. Задачи расчета прочности корпусов подводных лодок были возложены на П.Ф. Папковича. В 1925 г. он возглавил в Политехническом институте кафедру строительной механики, ему было присвоено звание профессора. Вместе с академиком А.Н. Крыловым он контролирует в 1927 г. конструкторское бюро Б.М. Малина в Ленинграде по подготовке серии первых подводных лодок Д-1 — по имени головной лодки «Декабрист», Д-2 — «Народоволец», Д-3 — «Красногвардеец».

12 октября 1931 г. три первые советские подводные лодки типа «Декабрист» вступили в состав подводных сил Советского Союза. На них был поднят Военно-морской флаг. В этом была заслуга и ученого-кораблестроителя П.Ф. Папковича.

В 1929 г. был создан Научно-исследовательский институт судостроения и судоремонта (НИИСС), заместителем директора и заведующим сектором судовых конструкций которого был назначен П.Ф. Папкович. В 1932 г. в «Известиях АН СССР»



П.Ф. Папкович опубликовал статью «Выражение интеграла основных уравнений теории упругости через гармонические функции». Приведенное в ней решение стало классическим в теории упругости.

В 1934 г. П.Ф. Папкович был назначен начальником кафедры строительной механики Военно-морской академии, на этой должности оставался до конца своих дней. Участвовал в проектировании первых советских подводных лодок, а также в глубоководных испытаниях некоторых из них, курируя, в частности, вопросы прочности корпусов. Ни одна из проблем динамики конструкций не проходила мимо внимания П.Ф. Папковича.

В годы войны консультировал руководство Николаевского судостроительного завода им. Марата, эвакуированного в Астрахань, по вопросам переоборудования судов с целью монтажа на них артиллерийских установок. В эти годы закончил работу «Строительная механика корабля», за которую был удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР» и Государственной премии. Общее число научных работ П.Ф. Папковича около 130, доктор технических наук (1935), член-корреспондент АН СССР (1933), заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1935), лауреат Государственной премии (1946), инженер-контр-адмирал (1940).

Награжден двумя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, медалями.



Другой наш знаменитый земляк, выдающийся ученый в области теории упругости и талантливый математик, академик АН СССР, инженер-генерал-лейтенант Галеркин Борис Григорьевич родился 4 марта 1871 г. в г. Полоцке.

В 1899 г. окончил Петербургский технологический институт. В 1906 г. за участие в революционном движении был осужден. Преподавательскую деятельность начал в 1909 г.

Труды Бориса Григорьевича, относящиеся к проблемам строительной механики и теории упругости, способствовали внедрению современных методов математического анализа в исследования работы сложных сооружений, конструкций и машин, в том числе кораблей.

Он разработал эффективные методы точного и приближенного интегрирования уравнений теории упругости. Является одним из создателей теории изгиба пластинок. Исследовал влияние формы пластинки на распределение в ней усилий, эффект распределения местного давления, влия-

ние упругости опорного контура. Предложенная Б.Г. Галеркиным в 1930 г. форма решения уравнений упругого равновесия, содержащая три би-гармонические функции, позволила эффективно решить многие важные пространственные задачи теории упругости. В работах по теории оболочек он отказался от общепринятых гипотез относительно характера изменения смещений по толщине и ввел другие допущения, обеспечивающие большую точность и возможность распространить теорию на оболочки средней толщины.

На Военно-Морском Флоте Б.Г. Галеркин с 1940 г. С первых дней Великой Отечественной войны возглавлял группу экспертов при начальнике инженерной обороны Ленинграда. Член комиссии при Военном совете Ленинградского фронта по строительству оборонительных сооружений. В 1942 г. руководил разработкой темы «Обоснование расчетами ледяных переправ под нагрузку различного вида военных грузов». Возглавлял Всесоюзное научное инженерно-техническое общество строителей. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1934), академик Академии наук СССР (1935), лауреат Государственной премии (1942) за исследования в области теории упругого равновесия цилиндрических оболочек, инженер-генерал-лейтенант (1942), награжден двумя орденами Ленина, медалями.

Еще один наш знаменитый земляк, крупный ученый военно-морского флота, усовершенствовавший тактику маневра и ведения боя кораблей, которая успешно применялась в годы Великой Отечественной войны, родился 15 июля 1897 г. в поселке Мазурино под Витебском. Это профессор, контр-адмирал Павлович Николай Брониславович.



В 1908 г. он поступил в Сибирский кадетский корпус, а завершил общее и специальное образование в мае 1917 г. в Петроградском Морском корпусе с присвоением первого офицерского чина мичмана и был назначен штурманским офицером дивизиона тральщиков Балтийского флота. С 1918 по 1931 г. проходил службу на кораблях Балтийского флота. Во время гражданской войны и в первые годы после ее окончания участвовал в тралении, очищая от мин Финский залив, был командиром тральщика, начальником дивизиона тральщиков.

Его богатейший практический опыт плавания постоянно подкреплялся расширением теоретических знаний. В 1925 г. Н.Б. Павлович стал членом Морского научного общества Балтийского флота.

В этом же году назначен на должность старшего помощника командира линкора «Парижская коммуна», затем командовал эсминцами «Рыков», «Сталин».

С 1931 г. — преподаватель Военно-морской академии. В течение ряда лет вел учебную и научную работу на кафедрах методики боевой подготовки, службы штаба и боевого управления, общей тактики морских сил. В феврале 1940 г. назначен на должность профессора, а в мае 1941 г. — начальника кафедры общей тактики. В течение этого времени им был написан ряд учебных пособий для слушателей академии и командного состава военно-морского флота, а также около 30 статей, опубликованных в журналах «Морской сборник» и «Судостроение». Наиболее значительные научные труды этого периода — «Маскировка на море», «Морские десанты», «Войсковые перевозки морем», «Наставление по боевой деятельности тралящих кораблей», «Руководство по тактическим и отрядным учениям». В 1931–1932 гг. участвовал в разработке проекта Корабельного устава.

Во время войны СССР с Финляндией в должности начальника штаба отряда особого назначения Краснознаменного Балтийского флота принимал участие в планировании и подготовке десантов.

В годы Великой Отечественной войны Н.Б. Павлович активно участвует в подготовке кадров для флота, продолжает разработку цикла учебных пособий по общей тактике морских сил с учетом опыта боевых действий как советского, так и иностранных флотов и одновременно пишет ряд работ по заданию Главного Морского штаба. Во время войны им написаны такие труды, как «Руководство по огневому содействию флангу сухопутных войск», «Боевое обеспечение по опыту текущей войны», «Оборонительный бой», «Встречный бой в море», «Оборона стоянки флота», «Бой в море ночью и в тумане».

Для изучения практического боевого опыта неоднократно выезжал на действующие флоты и флотилии. При этом, не ограничиваясь ролью наблюдателя, оказывал большую помощь командованию. Так, в октябре 1944 г. в должности начальника походного штаба Северного флота участвовал в операции по освобождению Советского Заполярья.

В 1945–1947 гг. написал курс лекций по общей тактике морских сил, соответствующий требованиям новой учебной программы академии.

Источники информации:

1. Великие художники. — М.: Издательский дом «Комсомольская правда», 2010. — Т. 2: Айвазовский.
2. Шавшин, В. Севастополь в истории Крымской войны / В. Шавшин. — Севастополь, Киев: Телескоп, Артополитика, 2004.
3. Соколовский, В.В. О жизни и научной деятельности наук академика Б.Г. Галеркина / В.В. Соколовский. // М.: Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1951. — № 8.
4. Долготович, Б.Д. Адмиралы земли белорусской / Б.Д. Долготович. — Минск: Беларусь, 2009.

В 1949–1951 гг. возглавлял авторский коллектив учебника «Курс общей тактики ВМС».

Кандидат военно-морских наук (1942), профессор (1951), контр-адмирал (1944).

Награжден орденом Ленина, двумя орденами Красного Знамени, орденами Отечественной войны 1-й степени, Красной Звезды и многими медалями.

В 1964 г. под редакцией Н.Б. Павловича был издан двухтомный труд «Флот в первой мировой войне». В 1973 г. вышла книга «Советское военно-морское искусство в Великой Отечественной войне» (В.И. Ачкасов, Н.Б. Павлович).

До конца своих дней работал старшим научным сотрудником Исторической группы Военно-Морского Флота.

В память о крупном ученом в 1990 г. в «Воениздате» вышел капитальный труд «Развитие тактики Военно-Морского Флота» в 4 томах, который был подготовлен по материалам и рукописям, сохранившимся в личном архиве Н.Б. Павловича.

В Севастополе стоит памятник, на котором высечены слова: «Потомству в пример» — в честь славного подвига экипажа русского брига «Меркурий» под командованием нашего земляка Александра Ивановича Казарского.



И этот пример героя не раз вдохновлял в своей деятельности упомянутых выше знаменитых исследователей П.Ф. Попковича, Б.Г. Галеркина, Н.Б. Павловича, а также других наших земляков — ученых, инженеров, моряков, офицеров и флотоводцев. Среди них есть и те, кто получил в свое время квалификацию «инженер-механик». Например, родившиеся на земле белорусской: в городе Пинске контр-адмирал Трайнин; в деревне Глинчина Климовичского района вице-адмирал Бисовка Николай Захарович; в городе Кировске вице-адмирал Цвирко Валерий Михайлович; в деревне Клепачи Слонимского района вице-адмирал Апанович Василий Никанорович; а также выросший на брестской земле вице-адмирал Бирилло Николай Николаевич.

Их боевой и ратный труд — пример настоящему и будущему поколению.

НАШ ОТВЕТ ЧЕМБЕРЛЕНУ, ИЛИ СТРАТЕГИЧЕСКАЯ АВИАЦИЯ СССР

Клеванец Ю.В.

(Продолжение. Начало см. в № 44–46)

Дальний тяжелый сверхзвуковой бомбардировщик Ту-22

В литературе говорится, что инициативу А.Н. Туполева о разработке дальнего тяжелого сверхзвукового бомбардировщика подтолкнула катастрофа Ту-95-1, после которой в Министерстве авиационной промышленности всерьез обсуждалась возможность передачи Куйбышевского авиационного завода для производства бомбардировщиков Мясищева.

Предложение заинтересовало министерство, и уже в июле 1954 г. вышло Постановление СМ СССР о начале работ по данному самолету. Предлагалось использование двигателей ВД-7М КБ В. Добрынина, сделанных по схеме ТРДФ (турбореактивный с форсажем). Тяга двигателей на форсаже — 16500 кг. Шифр самолета с такими двигателями — «105».

С 1956 г. начинаются работы по второму подобному самолету с шифром «106» под двигателями НК-6 КБ Н. Кузнецова, изготовленные по схеме ТРДДФ (турбореактивный двухконтурный с форсажем). Двигатели обещали максимальную тягу более 20 т.

В августе 1957 г. был готов первый опытный самолет «105», только в сентябре для него были поставлены двигатели и то с ограничениями по тяге (не более 13 т) и по ресурсу (до 50 ч). В июне следующего года состоялся первый полет. В это время в КБ уже готовили чертежи на самолет-ракетоносец «105А». Он совершил первый полет в сентябре 1959 г. Главным конструктором обоих вариантов был назначен Д.С. Марков.

Обе первые машины — и «105», и «105А» — были потеряны в аварии. Тем не менее, с 1959 г. новый

бомбардировщик был запущен в серийное производство на Казанском авиационном заводе под маркой Ту-22.

Самолет «106» оказался сложнее, чем изначально предполагалось, работы по нему были прекращены Постановлением правительства в 1962 г.

Описание конструкции

Внешне Ту-22 напоминает пассажирский самолет Ту-134, особенно при взгляде с земли на летящий в небе бомбардировщик. Еще больше он похож на учебно-боевой вариант гражданской машины Ту-134 УБЛ с «острым» носом. Однако Ту-22 крупнее, чем Ту-134, по размерам и по массе он ближе к пассажирскому Ту-154. Это во-первых.

Во-вторых, Ту-22 — сверхзвуковая машина, намного более «заостренная», с большими углами стреловидности всех поверхностей. Соответственно у военных она получила кличку «Шило». Лобовые стекла пилотской кабины выставлены острым клином, профили всех несущих поверхностей сверхзвуковые, тонкие и заостренные.

В-третьих, двигатели Ту-22 подняты над фюзеляжем, они даже по виду значительно крупнее, чем у Ту-134. Воздухозаборники двигателей перемещаются при помощи гидравлики, регулируя приток воздуха на разных скоростях полета (в литературе говорится, что воздухозаборники отслеживают два состояния: «малый газ» и «большой газ»). Сзади между соплами двигателей



установлен колпак радиолокационного прицела «Аргон», контейнер для тормозного парашюта и пушка калибром 23 мм в шарнирном подвесе. Вообще говоря, хвост самолета сконструирован не очень удачно: и с точки зрения эстетики, и с точки зрения аэродинамики было бы лучше, если бы он был заострен так же, как нос.

Основной материал конструкции — алюминиевые сплавы. Это листы и профили из ряда сплавов типа Д16, поковки из сплавов типа АК-8. Сообщается о применении В95. Применяются также стали типа 30ХГСА, 27ХГСНА и магниевые литейные сплавы. Последние интересны тем, что, подобно чугунам, хорошо гасят вибрации, хотя и довольно хрупки. Удельная прочность сплавов магния порой даже несколько выше, чем у Д16Т.

Фюзеляж круглого сечения, значительную его часть занимают баки и бомбоотсек. В варианте Ту-22К бомбоотсек приспособлен для подвешивания ракеты. В передней части фюзеляжа расположены по порядку: отсек РЭО (радиоэлектронное оборудование), кабина, в которой находятся три человека: штурман-бомбардир, пилот, оператор систем обороны (он же радист и бортехник). Экипаж попадает в кабину на сиденьях, которые спускаются из кабины вниз при помощи лебедок. В литературе отмечаются случаи обрыва тросиков, выпадения членов экипажа из кабины, травм на земле безо всяких катастроф самолета. В аварийной ситуации экипаж катапультируется вниз.

За кабиной расположены баки, отсек бортового оборудования, контейнер со спасательной лодкой, центроплан с баками, бомбоотсек, снова баки, хвостовой отсек с РЭО, тормозным парашютом, артустановкой, местами крепления оперения и двигателей. Нужно отметить, что во всяком случае на первых сериях самолета экипаж сам должен был следить за центровкой самолета, перекачивая по мере необходимости топливо из передних баков в задние, и наоборот. Эта особенность конструкции в эксплуатации послужила причиной нескольких аварий и катастроф.

Крыло — типичное по виду для туполевских машин, двухлонжеронное, кессонное, с аэродинамической круткой, наплывом и «заостренными» сверхзвуковыми профилями. В качестве посадочной механизации применяются одноцелевые закрылки. Внешние секции закрылков имеют дополнительную ось качания, они работают как элероны-закрылки на малых скоростях.

Впрочем, понятие «малые скорости» для этого самолета условны: при массе 92 т допускается скорость полета не менее 430 км/ч, посадочная скорость — 330 км/ч.

Шасси тоже типично для туполевских машин, трехпорное (диаметр колес основных стоек 1100 мм), с уборкой по направлению полета. Основные стойки шасси убираются в специальные гондолы, подвешенные за крылом, что опять же характерно для самолетов КБ Туполева. Шасси в убранном положении дают дополнительную нагрузку на задний лонжерон крыла, гондола уменьшает поверхность закрылков. Этих негативных моментов не было, если бы основные опоры шасси убирались «под себя», в фюзеляж. Однако в этом случае конструкторам надо было бы думать, как разместить большую ракету — основное оружие Ту-22.

Самолет выпускался в вариантах бомбардировщика, ракетносца (ракета Х-22 конструкции КБ А.Я. Березняка), разведчика, постановщика помех, учебного. Максимальная взлетная масса до 92 т. Топлива — до 44,3 т. Боевая нагрузка — до 12 т. Скорость — до 1510 км/ч. Дальность без дозаправки — до 5800 км.

История создания и производства

Прежде всего, надо заметить: при разработке и производстве Ту-22 советская авиационная промышленность по-видимому, столкнулась с той же ситуацией, что была и в конце 1930-х гг., когда остро встал вопрос замены деревянных конструкций на металлические, и во второй половине 1940-х гг., когда потребовалось внедрение электроники, реактивных двигателей и т. д. Ту-22 оказался сложен и для лучшего в стране Казанского завода. Более того, потребовался выход на новый уровень производства всех смежников. Ненадежная работа приборов и агрегатов не раз приводила к авариям при испытаниях и в эксплуатации.

Но вернемся к началу промышленного производства бомбардировщика. Казанский авиазавод в июне 1960 г. выдал первую машину так называемой «установочной» серии. От первых опытных самолетов, построенных на Московском заводе при КБ Туполева, она отличалась наличием цельноповоротного горизонтального оперения (ЦПГО).

Из-за сложности конструкции и систем бомбардировщика было принято решение, что вся «установочная» серия в 20 машин будет использована для ускорения испытаний. Испытания сразу же выявили массу недостатков. Устранение их требовало внесения изменений в конструкцию и тех самолетов, что в тот момент находились в заводских стапелях. Так что первая партия машин «пошла» с очень большим трудом. Оказалось, что самолет «не добывает» по всем заявленным ТТХ

(полученная скорость, к примеру, равнялась только 1465 км/ч). И, тем не менее, эскадрилья уже серийных Ту-22 с грохотом пронеслась над трибунами на авиационном празднике на аэродроме в Тушино в июле 1961 г., продемонстрировав миру, что в СССР умеют делать не только ракеты.

В процессе испытаний началось переоборудование нескольких самолетов в вариант разведчика и постановщика помех, что потребовало новых испытаний. Основной цикл испытаний окончился в октябре 1962 г. (машины «установочной» серии «гонялись» до 1965 г.), вторая серия самолетов пошла в войска.

Одними из первых новые бомбардировщики получили 121-й Гвардейский полк в Мачулищах и 203-й Гвардейский полк в Барановичах.

Основное назначение Ту-22 в ВВС СССР — противодействие американским ударным морским группировкам. С конца 1960-х гг. началось дооборудование всех боевых самолетов системами дозаправки в воздухе.

Ту-22 был сложен как в эксплуатации, так и в обслуживании. Летал он лихо, по-истребительному (скороподъемность при нормальной нагрузке составляла 50 м/с), однако очень большая посадочная скорость требовала от летчиков предельной внимательности и твердой руки. Между прочим, отмечаются случаи, когда в эксплуатации происходило разрушение кирпичной кладки, когда над какой-нибудь постройкой низко пролетал Ту-22 на максимальной скорости. Да и на небольшой скорости этот самолет был очень «громким». Сложность машины порой приводила к авариям и катастрофам. Всего с 1960 по 1989 г. потеряно 31 самолет, погибло 44 человека из экипажей.

В целом было построено около 300 самолетов типа Ту-22. Несмотря на сложность, они долго стояли на вооружении ВВС Советского Союза. Только с началом 1990-х гг. эти машины постепенно стали выводиться из эксплуатации. К 1995 г. в войсках не осталось ни одного самолета этого типа.

Боевое применение

Самолеты Ту-22 всех вариантов, стоявшие на вооружении СССР, ни разу не применялись в боевой обстановке.

Однако не менее 30 машин этого типа (разведчики, переоборудованные в бомбардировщики, а также учебные Ту-22У) были проданы в Ирак и в Ливию. В СССР для них обучались арабские экипажи. Поставки самолетов велись с начала 1970-х гг. в течение 15 лет.

Уже в 1978 г. Муамар Каддафи вмешался в вооруженный конфликт между Угандой и Танзанией.

Он решил помочь угандийскому диктатору Иди Амину. Соответственно ливийские Ту-22 разбомбили танзанийский город Мванза. Затем те же Ту-22 несколько раз наносили удары по целям в Чаде и в Судане в ходе многолетних гражданских войн в этих странах. Представить хотя бы более-менее достоверную картину участия Ту-22 в тех войнах не сможет, наверное, никто. Есть сведения о потерях, но в целом информация крайне противоречива: каждая из сторон только хвалит сама себя. Известно только, что в 1995 г. на вооружении ВВС Ливии еще стояли 5 Ту-22.

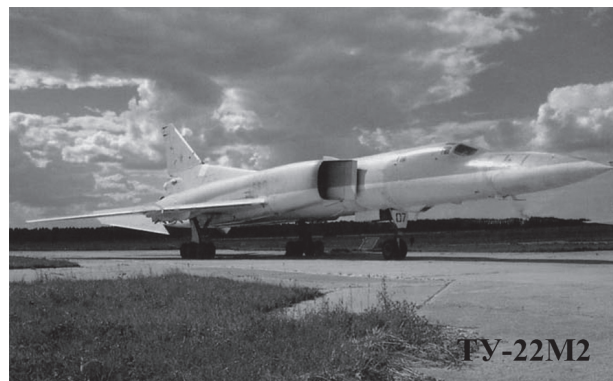
Иракские бомбардировщики активно использовались во время войны с Ираном. Однако информация об их использовании так же противоречива, как и с ливийскими машинами.

Дальний тяжелый сверхзвуковой бомбардировщик Ту-22М

Главный конструктор Д.С. Марков

Тяжелый дальний бомбардировщик Ту-22 не совсем удовлетворил заказчика. ВВС хотели бы получить самолет с большей скоростью и дальностью, с меньшими дистанциями взлета и посадки, более многофункциональный. Поэтому когда в СССР теоретически были обоснованы возможности применения крыла с изменяемой стреловидностью, такое крыло рекомендовалось для модернизированного варианта бомбардировщика.

На самой «фирме» Туполева возможности для дальнейшего совершенствования Ту-22 начали изучать в 1965 г. За основу при проектировании был взят самолет «106», о котором говорилось выше. Поначалу планировалось не отступать от прежней схемы самолета с двигателями, поднятыми над фюзеляжем. Однако настойчивые требования ВВС увеличить дальность и сделать возможными маловысотные полеты вместе со столь же настойчивыми предложениями ввести крыло изменяемой стреловидности заставили конструкторов кардинально пересмотреть компоновку и внешний облик бомбардировщика.



ТУ-22М2

Описание конструкции

Тяжелые узлы навески переставных частей крыла вызвали необходимость усиления всей силовой схемы. Соответственно масса конструкции увеличивалась на 5 %, а взлетная масса — на 7 %. С другой стороны, при минимальной стреловидности появлялась возможность полета на высокой дозвуковой скорости, что позволяло экономить топливо. Двигателями для нового самолета были выбраны НК-144 — те, которые предполагалось поставить на Ту-144, но доработанные под использование на бомбардировщике. Тяга двигателей 20 т, расход топлива в «экономном» режиме 0,85 кг/кгсч ч. Новые двигатели были заметно крупнее тех, которые стояли на Ту-22, а это ставило под сомнение возможность их крепления над фюзеляжем. Кроме того, против навески двигателей на фюзеляж активно выступал ЦАГИ. Соответственно конструкторы поместили двигатели в фюзеляж и разработали боковые воздухозаборники. Увеличенная дальность полета потребовала введения в состав экипажа второго пилота (т. е. теперь стало два пилота, штурман-навигатор и штурман-бомбардир — оператор оружия). Таким образом, вместо модернизации прежнего Ту-22 постепенно рождался совершенно новый самолет.

Новый бомбардировщик должен был применяться для ударов как по сухопутным, так и по морским целям с использованием ракет Х-22 или бомб — обычных или ядерных, свободнопадающих или управляемых. Самолет должен был быть способен совершать полеты на большую дальность на дозвуковой скорости на средней или на большой высоте, сверхзвуковой прорыв зоны ПВО противника на той же высоте или полет на высоте не более 200 м с околозвуковой скоростью.

При этом ВВС настаивали на как можно меньших дистанциях взлета — посадки, на использовании для обороны не только системы РЭБ, но и пушечного оружия, на возможности катапультирования экипажа вверх.

В результате получился самолет не очень-то похожий на бомбардировщик. Он крупнее и тяжелее, чем пассажирский Ту-154, но максимально «зализанные» формы скрадывают истинные размеры машины.

Крыло с мощным наплывом, дающим эффект увеличения общей стреловидности, оснащено сложной механизацией. Для увеличения площади посадочных закрылков и для избавления от тяг внутри поворотных частей крыла было решено заменить традиционное управление по крену при помощи элеронов на интерцепторы (как на американском Б-52). Кроме того, всю переднюю кромку поворотной части крыла занимает пред-

крылок, позволяющий увеличить угол атаки несущих поверхностей на малых скоростях. Бомбы и ракеты могут размещаться как на внешних узлах подвески под фюзеляжем и под крылом, так и в бомбоотсеке внутри фюзеляжа.

Сложная механизация крыла, возможность использования разных видов оружия и «многорежимность» полета потребовали увеличения радиоэлектронного и приборного оборудования.

Самолет оснащен нормальным трехопорным шасси с шестиколесными тележками на основных опорах. В полете основные опоры убираются «под себя», в ниши на фюзеляже.

Самолет защищается двухпушечной поворотной установкой в корме, управляемой по радару и по телевизионному прицелу.

История создания

Летом 1967 г. вышло постановление правительства, открывшее финансирование разработки. В этом году конкурент тяжелого бомбардировщика КБ Туполева — самолет Су-100 (Т-4) — уже завершался проектированием.

В октябре того же года был готов макет будущего Ту-22М. К работам подключился Казанский авиационный завод, и августе 1969 г. был построен первый опытный экземпляр. Надо отметить: с конца 60-х гг. прошлого века с увеличением оборудования на самолетах стало невозможно проводить весь комплекс испытаний на одной или двух машинах. Сейчас следует говорить не об опытных самолетах, а об опытных партиях.

В процессе проектирования количество одновременно подвешиваемых ракет выросло до 3, а бомбовая нагрузка возросла до 24 т. Взлетная масса увеличилась до 122 т.

Казанский завод один за другим выпустил десять самолетов опытной серии, которые по мере готовности подключались к испытаниям.

Результаты испытаний в целом не радовали, как это и бывает с любыми сложными объектами, на которые возлагают большие надежды. Ту-22 первой партии (названной М0) не таил каких-либо принципиальных пороков и опасностей, но и звезд не хватало. Были достигнуты скорость 1530 км/ч, дальность 4100 км, дальность пробега при посадке составила 2500 м.

В декабре 1969 г. было начато проектирование второй партии, названной М1. В нее вносились изменения по результатам испытаний самолетов М0, оконченных постройкой в 1972 г. На этих машинах были установлены двигатели НК-22, специально рассчитанные на применение на самолетах данного типа. Испытания партии М1 длились до 1975 г. Были получены скорость 1660 км/ч и дальность полета 5000 км.



Весной 1973 г. завод покинул первый самолет из серии М2 и тоже подключился к испытаниям. На нем стоял двигатель с повышенной экономичностью. Новый вариант самолета показал скорость с одной ракетой до 1700 км/ч (всего мог нести три ракеты), дальность 5100 км, посадочная дистанция сократилась до 2300 м. Самолет был оснащен системой дозаправки в воздухе.

Вариант М2 в 1975 г. был принят на вооружение и пошел в серию. Всего было построено 211 машин. В этом же году в КБ Кузнецова на основе двигателей НК-144 и НК-22 был изготовлен новый мотор НК-25 трехвальной конструкции (в нем разным рядом лопаток компрессора придается разная скорость вращения для получения максимально возможной степени сжатия). Он развивал тягу в 25 т, а расход топлива на экономичном режиме удалось снизить до 0,75 кг/кгсч. Первый бомбардировщик с двигателями НК-25 был изготовлен в 1976 г. и получил обозначение М3.

Самолеты Ту-22М3 приняты на вооружение в 1983 г. (по другим сведениям в 1981 г.) и составили основную силу дальней авиации СССР в 1980-х гг. Всего их до развала СССР было выпущено 286. Те же Ту-22М3 вместе с вариантом М2, сведенные в 37 воздушную армию, представляют собой Дальнюю авиацию России и по сей день. По договору ОСВ-2 с бомбардировщиков Ту-22М были демонтированы системы дозаправки в воздухе.

У вариантов М2 и М3 было и боевое применение. Они участвовали в налетах на базы афганских душманов в 1980-х гг. При этом применялись бомбы калибром от 500 до 3000 кг.

Основное оружие Ту-22М — это ракеты Х-22, Х-22М, а с середины 1970-х гг. Х-22Н (низковысотная). Она разработана на Дубнинском производственном объединении «Радуга», выросшего из КБ А.Я. Березняка.

Главный конструктор этого КБ, образованного в 1946 г. специально для проектирования тяжелых ракет, был в то время известен как один из разработчиков ракетного самолета БИ (совместно с Исаевым, см. «Инженер-Механик» №2(23)2004г.). Ракета очень сложна в эксплуатации из-за использования так называемого «высокомолекулярного»

топлива с исключительно большой химической активностью, разработанного еще в фашистской Германии. Окислитель для него — азотная кислота — также очень опасен. Однако такое топливо дает наибольший импульс из всех прочих и сообщает ракете гиперзвуковые скорости. Ракета Х-22Н вследствие многолетних скрупулезных испытаний и доводок имеет очень малое круговое вероятное отклонение (КВО), что позволяет использовать ее не только с атомной, но и с обычной, фугасной или осколочной, боевой частью.

Задачи тяжелых ракет «воздух — поверхность» Х-22 такие: «...поражение ракетно-ядерных, авиационных и морских группировок, оперативно-стратегических резервов, военно-промышленных и энергетических объектов, а также нарушение оперативно-стратегических перевозок, государственного и военного управления».

Считается, что от момента появления на экране радаров, к примеру эскортных кораблей авианосного соединения «вероятного противника» атакующего носителя Ту-22М, до момента, когда ракета, пущенная с этого носителя, врежется в борт корабля-цели, пройдет не более 5 мин. Принято думать, что «вероятный противник» за такой короткий промежуток времени не успевает организовать должное противодействие. При этом попадание ракеты Х-22Н даже с «обычным» тротильным боеприпасом производит в защищенном броней борту пробоину в 22 м². Этого вполне достаточно для потопления крейсера или авианосца.

В СССР для разгрома авианосной ударной группировки «вероятного противника» планировалось одновременное применение полка самолетов Ту-22М. В конце 1980-х гг. в Советском Союзе разработаны твердотопливные ракеты Х-15 для замены Х-22Н. Однако в связи с распадом СССР они не прошли весь цикл испытаний. Имея гораздо более высокие, чем Х-22Н эксплуатационные характеристики, Х-15 и до сего времени не столь точна и не столь надежна. Новые ракеты возможно применять только в «атомном» исполнении, о полной замене старых ракет пока не может быть и речи.

Сравнительные характеристики Х-22М и Х-15

Параметры	Х-22М	Х-15
Длина, м	11,65	4,78
Размах/диам. корпуса, м	3,0	0,92
Масса снаряженной, кг	5780	1200
Масса БЧ, кг	630	150
Число Маха	4	5
Дальность, км	360	150

Ракетами Х-22, Х-22М, Х-22Н кроме Ту-22М оснащались также бомбардировщики Ту-16, Ту-22, Ту-95К, 3М.

Продолжение в следующих номерах

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ВЕТРОВЫХ АГРЕГАТОВ, СПОСОБНЫХ ЭФФЕКТИВНО РАБОТАТЬ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РЕГИОНАХ МИРА

к. т. н., В.А. Юшко

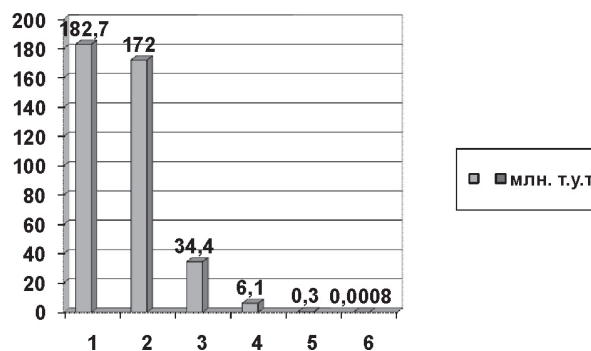
Представлены материалы 15-летней разработки автора по созданию новых ветровых агрегатов Юшко (ВАЮ) с горизонтальной осью вращения турбины и новыми лопастями, которые способны снять барьер, установленный на сегодня для существующих ВЭУ по использованию их в регионах со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с на высоте 10 м от поверхности земли, увеличить технический потенциал по возможности использования энергии ветра новыми ветровыми агрегатами ВАЮ во всех регионах мира до 5 раз относительно установленного в настоящее время для использования ВЭУ с горизонтальной осью вращения и авиационным профилем лопастей, повысить эффективность работы новых ВАЮ по коэффициенту использования мощности (КИМ) до 95 % — в зависимости от мощности агрегата и его номинальной расчетной скорости ветра в ветровой турбине — даже в регионах со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с. Показано, что все это достигается за счет использования новых технологий изготовления лопастей и ветровых турбин, которые могут хорошо улавливать тихие и слабые ветра со скоростями 1–5 м/с, имеющих максимальную продолжительность работы по времени в году до 60–70 %, но у существующих ВЭУ они относятся к штилевой зоне, так как не могут улавливаться авиационным профилем лопастей.

Эта разработка была представлена на «Ярмарке инновационных идей», которая проходила 26 мая 2010 г. в г. Минске и была организована Бизнес-союзом предпринимателей и нанимателей имени М.С. Кунявского.

Есть ли в Беларуси ветер и каков его потенциал?

Исследования, выполненные за последние 15 лет организациями «Белгидромет», «Белэнергосетьпроект», «Ветромаш» и автором данного проекта, показали (Гистограмма 1, поз. 3), что ветер в Беларуси есть. Он дует до 95 % от годового времени, или 8322 ч в году. Но эффективно использовать его до настоящего времени еще не научились.

Потенциал Белорусских ветров представлен на Гистограмме 1: 1 — теоретический; 2 — технически возможный для использования новыми ветровыми агрегатами ВАЮ; 3 — технически возможный для использования существующими ВЭУ; 4 — экономически целесообразный потенциал ветра, рекомендованный автором данной разработки в феврале 2008 г. для программы развития ветроэнергетической отрасли РБ с целью замещения импорта природного газа на 24 %; 5 и 6 — потенциальные запасы ветра в Беларуси и годовой объем использования ветрового потенциала соответственно, представленные в Государственной программе по развитию энергетики 2005 г.



Эффективность работы существующих ВЭУ с горизонтальной осью вращения и авиационным профилем лопастей

Проведенный автором данной разработки анализ работы лучших в мире существующих ВЭУ с авиационным профилем лопастей показал (гистограмма 1), что в связи с имеющимися у них основными недостатками — ограничением возможности использования по среднегодовой скорости ветра 5 м/с и высокой расчетной скоростью ветра в ветровой турбине 11–18 м/с, существующие ВЭУ имеют низкую эффективность по времени работы в году, которая, согласно опубликованному в 2000 г. опыту эксплуатации всех ВЭУ в Германии, не превышает 1613 ч, или 18,4 % от годового времени. При этом из имеющегося годового потенциала ветра полезно не может использоваться существующими ВЭУ до 60–75 % еще до их запуска.

Годовая продолжительность работы ветра

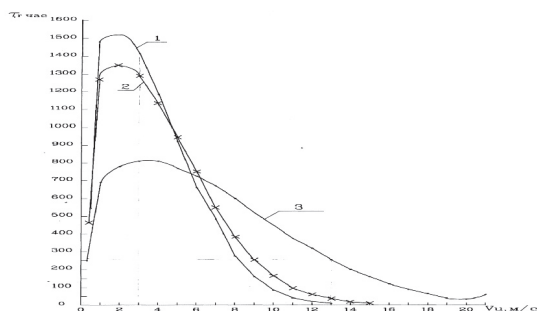


Рис. 1. Годовая продолжительность работы различных скоростей ветра на территории Беларуси (T_g) в зависимости от истинной скорости ($V_{и}$): 1 — при среднегодовой скорости ветра $V_z = 3,5$ м/с на высоте $H = 10$ м; 2 — при $V_z = 4$ м/с, $H = 10$ м; 3 — при $V_z = 6,7$ м/с, $H = 40$ м. Пунктирными линиями разных цветов показано возможное время работы на номинальных параметрах: черными — существующих ВЭУ с номинальной расчетной скоростью ветра $V_n = 12$ м/с; синими — новых ВАЮ с $V_n = 5$ м/с; красными — новых ВАЮ с $V_n = 1$ м/с

Постановка задачи данного инновационного проекта

Разработать и создать новые ветровые агрегаты с турбинами, имеющими горизонтальную ось вращения и с новыми лопастями, которые будут способны улавливать ветра со скоростью 1–5 м/с, чтобы они могли работать с повышенной эффективностью в условиях Белорусских ветров и других континентальных регионах мира со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с.

Пути решения задачи

1. Проведение исследований для поиска новых лопастей с аэродинамическими характеристиками, способными хорошо улавливать тихие и слабые ветра со скоростями 1–6 м/с;

2. Разработка методики аэродинамических и прочностных расчетов новых лопастей в составе колеса ветровой турбины с учетом их системы регулирования;

3. Выполнение предварительных многовариантных аэродинамических, прочностных и технико-экономических расчетов новых ветровых агрегатов ВАЮ с разработкой конструкторской и технологической документации по результатам расчетов, для проверки возможности их изготовления с различными номинальными расчетными скоростями ветра в ветровой турбине в диапазоне мощностного ряда от 1 до 300 кВт;

4. Разработать и создать опытные и серийные ВАЮ с номинальной расчетной скоростью ветра 1–9 м/с в зависимости от мощности агрегата и его номинальной расчетной скорости ветра, способных эффективно работать в регионах со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с.

Результаты решения задачи

1. В результате поиска и исследований различных профилей с аэродинамическими характеристиками был найден нужный профиль новых лопастей, который имеет хорошие экспериментально проверенные аэродинамические характеристики в области скоростей ветра 1–6 м/с, полученные при продувках в тоннелях Саутгемтонского университета (Англия) аналогов новых лопастей парусного типа.

2. За счет улучшенных аэродинамических характеристик новых лопастей открывается возможность снижения номинальной расчетной скорости ветра в ветровой турбине с такими лопастями до 1–9 м/с в зависимости от мощности ВАЮ и его номинальной скорости ветра.

3. На новую «Лопасть-парус ветрового агрегата (ВАЮ)» был получен патент Российского агентства по патентам и товарным знакам № 2131996 от 20.06.1999 г. с приоритетом от 30.06.97 г. Автор изобретения — В.А. Юшко. Последующие технологические и конструктивные решения по разработке ВАЮ не патентовались. Они являются «ноу-хау».



Разработка методики расчета ВАЮ

Были разработаны методики аэродинамического и прочностного расчета на ЭВМ новых лопастей в составе ветровой турбины с учетом их системы регулирования. Расчеты базируются на экспериментально проверенных данных аэродинамических продувок этих лопастей с учетом оптимизации их по изменению положения лопасти во вращающемся колесе ветровой турбины. Система регулирования предусматривает возможность работы ВАЮ на номинальной нагрузке до скорости ветра 20 м/с.

Расчетные исследования ВАЮ

Предварительные расчетные исследования различных вариантов ВАЮ по мощности одного агрегата от 0,25 до 1000 кВт проводились на ЭВМ при номинальных расчетных скоростях ветра в диапазоне от 1 до 9 м/с для определения:

- 1) габаритов колеса ветровой турбины;
- 2) количества необходимых лопастей в колесе турбины;
- 3) проведения конструкторских и технологических проработок с целью проверки возможности изготовления ВАЮ с разными системами регулирования;
- 4) проведения технико-экономических исследований новых ВАЮ в сравнении с существующими ВЭУ аналогичной мощности.

Результаты расчетных исследований

Результаты предварительных расчетных исследований зависимости диаметра колеса ветровых турбин ВАЮ в диапазоне мощностей 0,25–300 кВт от номинальной расчетной скорости ветра представлены в табл. 1. Из представленных данных видно, что создание ветровых агрегатов ВАЮ с новыми лопастями парусного типа возможно реализовать на практике с различными номинальными расчетными скоростями ветра от 1 до 10 м/с в зависимости от единичной мощности ВАЮ. Например, ветровой агрегат ВАЮ-0,25-1-0,95 можно разработать и создать, который будет работать с номинальной нагрузкой 0,25 кВт и номинальной расчетной скоростью ветра 1 м/с в колесе ветровой турбины диаметром 35 м. Коэффициент использования мощности у него будет достигать 95 % за счет использования всего диапазона ветра от 1 до 20 м/с на номинальной нагрузке. Такие ветровые агрегаты способны эффективно работать даже в регионах со среднегодовой скоростью ветра 2 м/с, например в Якутии.

Таблица 1

Зависимость D_k ВАЮ от V_n в ветровых турбинах мощностью 0,25–300 кВт. Темным цветом выделены варианты возможные для изготовления лопастей, технология которых освоена на сегодня в парусном спорте

P, кВт	Dк, м	Vн, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,25	Dк,1		35	12	6,7	4,4	3,1	2,4				
5,5	Dк,2		168	59	32	21	15	11	9	7,4	6,2	5,3
7,5	Dк,3		191	67	37	24	17	13	10,3	8,5	7,1	6
11	Dк,4		231	81	44							
30	Dк,5		375	132	72	47	33	25	20	17	14	12
55	Dк,6		502	177	98	63	45	34	27	22	19	16
110	Dк,7		707	250	136	88	63	48	38	31	26	22
160	Dк,8		852	301	164	107	76	58	46	38	32	27
200	Dк,9		953	337	183	119	85	65	52	42	35	30
250	Dк,10		1066	376	205	133	95	73	58	47	39	34
300	Dк,11		1168	412	224	146	104	79	63	52	42	37

Выполненные предварительные конструкторские, технологические проработки ВАЮ различной мощности до 50 кВт и технико-экономические расчеты их в сравнении с существующими ВЭУ аналогичной мощности тоже подтвердили возможность их создания с высокой эффективностью работы и конкурентной способностью ВАЮ за счет увеличения времени работы в году на номинальной нагрузке и общего (Гистограмма 1), а следовательно, и годовой выработки электрической энергии. Основные преимущества представлены в табл. 2, на примере ВАЮ-10-5 при льготном тарифе на электрическую энергию 0,123 \$/кВт·ч, согласно Постановлению Минэкономики РБ № 20 от 28.01.2010 г.

Таблица 2

Сравнение характеристик новой ветровой турбины ВАЮ-10-5 с существующими ВЭУ-10 кВт и ВЭУ-100 кВт при работе с $V_r = 5,2$ м/с на высоте 30 м

P, кВт	Dк, м	Vн, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,25	Dк,1		35	12	6,7	4,4	3,1	2,4				
5,5	Dк,2		168	59	32	21	15	11	9	7,4	6,2	5,3
7,5	Dк,3		191	67	37	24	17	13	10,3	8,5	7,1	6
11	Dк,4		231	81	44							
30	Dк,5		375	132	72	47	33	25	20	17	14	12
55	Dк,6		502	177	98	63	45	34	27	22	19	16
110	Dк,7		707	250	136	88	63	48	38	31	26	22
160	Dк,8		852	301	164	107	76	58	46	38	32	27
200	Dк,9		953	337	183	119	85	65	52	42	35	30
250	Dк,10		1066	376	205	133	95	73	58	47	39	34
300	Dк,11		1168	412	224	146	104	79	63	52	42	37

Из данных табл. 2 видно, что рассматриваемая ветровая турбина ВАЮ-10-5 мощностью 10 кВт с диаметром колеса 30 м, 6 лопастями, способными обеспечивать номинальную расчетную скорость ветра в турбине 5 м/с, может работать 8405 ч в году, из которых 4418 ч на номинальной нагрузке. При этом обеспечивается годовая выработка электрической энергии 54 175 кВт·ч, которая превышает по данному параметру эффективность работы существующей ВЭУ аналогичной мощности почти в 6 раз, а коэффициент использования мощности ВАЮ возрастает до 60 % с 11 % у существующего ВЭУ-10-11.

Один ветровой агрегат ВАЮ-10-5 мощностью 10 кВт с номинальной расчетной скоростью ветра в турбине 5 м/с может вырабатывать в году столько же электроэнергии, сколько вырабатывает существующая ВЭУ мощностью 100 кВт, т. е. один ВАЮ-10-5 по годовой выработке электроэнергии может заместить одну существующую ВЭУ, имеющую мощность в 10 раз превышающую мощность ВАЮ. При этом срок окупаемости ВАЮ-10-5 при льготном тарифе на электроэнергию 0,123 \$/кВт·ч снижается до 8–12 лет относительно 40–47 лет у существующих ВЭУ.

Результаты проведенных исследований

Результаты проведенных 15-летних исследований автором данной разработки в инициативном порядке показали:

- возможность разработки и создания новых лопастей и ветровых турбин различной мощности, способных улавливать ветра со скоростью 1–5 м/с, со снижением номинальной расчетной скорости ветра в турбине до 1–9 м/с, которые обеспечивают высокую эффективность работы в регионах со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с, с повышением коэффициента использования установленной мощности (КИМ) до 95 % в зависимости от мощности ВАЮ и номинальной расчетной скорости ветра;

- правильность выбранного направления дальнейшего развития ветроэнергетики для повышения эффективности работы ветровых агрегатов по КИМ;

- повышение технической возможности использования энергии ветра в различных регионах мира за счет новых технологий ВАЮ, позволяющих расширить диапазон используемых в работе ветров в область низких скоростей 1–5 м/с, имеющих максимальное время работы в году;

- открыли возможность для эффективного ис-

пользования ветровой энергии в различных регионах мира со среднегодовыми скоростями ветра менее 5 м/с за счет устранения новыми технологиями ВАЮ порога по среднегодовой скорости ветра 5 м/с, существующего на сегодня для использования ВЭУ;

- возможность расширения рабочих мест при организации производства, строительства и эксплуатации ВАЮ, а также рынка сбыта в мире для новой технологии и техники по использованию энергии ветра с ветровыми агрегатами ВАЮ;

Учитывая вышепредставленные преимущества новых технологий, используемых в ветровых агрегатах ВАЮ, они рекомендуются для дальнейшей разработки, создания и внедрения новых образцов конкурентно способной продукции различной мощности на внутреннем и на внешнем рынке в различных отраслях деятельности для замещения органического, постоянно дорожающего топлива, за счет эффективного использования, имеющегося во всех регионах мира собственного экологически чистого возобновляемого источника энергии — ветра, без ограничения его среднегодовой скорости.

Ориентировочная стоимость инновации

Планируемые затраты на создание опытных и серийных образцов ВАЮ будут разные в зависимости от их мощности и номинальной расчетной скорости ветра в турбине.

Из мировой практики создания опытных и серийных образцов известно, что стоимость опытного образца может превышать стоимость серийного образца от 2 до 4 раз.

Для обеспечения конкурентной способности ВАЮ и сохранения его срока окупаемости не более 10 лет удельная стоимость серийного образца, например ветровой турбины ВАЮ-10-5, не должна превышать 2970 \$/кВт, а общая с вспомогательными материалами — 6776 \$/кВт при существующем на сегодня льготном тарифе на электроэнергию в Беларуси 0,123 \$/кВт·ч.

Возможные сроки реализации инновации

Согласно предварительным оценкам, для реализации инновации ВАЮ необходимо от 2 до 3 лет.

Состояние инновации к реализации

Степень готовности инновации — в настоящее время она выведена на стадию НИОКР.

Возможные пути реализации инновации

- создание совместного производства ветровых турбин и агрегатов ВАЮ;

- продажа ноу-хау.