

А.А.ЛАРИН, канд. техн. наук; НТУ ХПИ

ВКЛАД УЧЕНЫХ ХАРЬКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА В РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ

В статье представлена история развития методов расчетов крутильных колебаний валопроводов силовых установок. Приводится вклад ученых ХПИ в решение этого вопроса в 30 – 70 годы минувшего столетия.

In article the history of development of methods of calculations torsion vibrations of shaft power-plants is submitted. The contribution of scientists KhPI to the decision of this question in 30 – 70 years of the last century is resulted.

Задача о крутильных колебаниях валопроводов силовых установок была одной из первых задач теории колебаний. Она сыграла заметную роль в развитии теории колебаний дискретных систем. Это обусловлено тем, что на протяжении десятков лет именно крутильные колебания валопроводов определяли прочность и надежность двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – основного источника энергии в XX столетии. Для решения этой задачи были разработаны многие методы, применявшиеся в теории колебаний, и в них были обнаружены новые колебательные явления, что во многом продвинуло развитие этой сравнительно молодой отрасли механики.

Задача исследования крутильных колебаний валопроводов возникла на рубеже XIX и XX веков в связи с увеличением мощности и скорости паровых машин. Поскольку эти машины являются машинами циклического действия с периодически меняющимися силами, в их валопроводах стали появляться крутильные резонансные колебания, часто приводящие к усталостному разрушению [1, с.13]. Не умея вычислить напряжений, обусловленных динамическими причинами, инженеры в сомнительных случаях зачастую просто увеличивали коэффициент запаса прочности. Однако увеличение размеров не всегда ведет к уменьшению напряжений [2, с.13]. В статье «К вопросу о явлении резонанса в валах», опубликованной в 1905 году в известиях Санкт-Петербургского политехнического института, С.П. Тимошенко дал анализ первых работ, посвященных этому вопросу [2, с.13-54]. Среди них он отметил статьи Г. Лоренца, Г. Фрама и Г. Мельвиля. Особенно полное исследование провел Г. Фрам, поставивший целый ряд опытов и обосновавший необходимость проверки конструкции валопровода на возможность резонанса [2, с. 24]. С появлением силовых установок с ДВС, имеющими большую скорость и мощность, вопрос об их колебаниях стал более остро [1, с. 171]. В основном задача сводилась к определению собственных частот и форм колебаний. Данная статья посвящена развитию

методов решения этой задачи в Харьковском политехническом институте в 1930-1970-е гг.

Для исследования крутильных колебаний валопроводов поршневых машин применяются дискретные механические модели, состоящие из абсолютно твердых дисков, соединенных невесомыми упругими валами, имеющими крутильную жесткость. При наличии в системе валопровода редукторов, она приводится к одному валу, как правило, это вал двигателя. Модель имеет цепную структуру, все обобщенные координаты являются углами поворота масс. Способы ее построения достаточно хорошо изучены. Для цепной системы дифференциальные уравнения колебаний легко записываются в прямой форме без применения аппарата аналитической механики. Длительное время основным средством борьбы с крутильными колебаниями валопроводов была отстройка системы от резонанса, что требовало только решения так называемого векового уравнения для определения частот и форм свободных колебаний. В случае исследования колебаний линейной системы использование спектральной теории, позволяет даже без записи дифференциальных уравнений решать задачи определения частот и форм свободных колебаний и находить амплитуды и фазы установившихся вынужденных колебаний. Для исследования колебаний валопроводов паровых машин и тихоходных дизелей применялись двух- и трехмассовые модели, для которых решение векового уравнения или системы линейных алгебраических уравнений не составляет особого труда, и основным вопросом при исследовании крутильных колебаний является определение параметров дискретной системы. Более подробно с задачами линейных крутильных колебаний дискретных систем можно ознакомиться в работе [3, с. 91-92].

Появление быстроходных ДВС облегченной конструкции привело к тому, что при крутильных колебаниях стали деформироваться и коленчатые валы. Это обстоятельство вынудило рассматривать системы с бóльшим числом степеней свободы. Однако для систем, имеющих пять и более степеней свободы, расчеты колебаний даже для линейных систем уже представляло серьезные затруднения.

Поэтому для них были разработаны различные методы. Из их множества наибольшее распространение получили *метод остатков*, предложенный в 1921 г. Максом Толле и *метод цепных дробей*, предложенный в 1930 г. инженером Коломенского паровозостроительного завода В. П. Терских, основанный на записи уравнения частот в виде непрерывной дроби.

Если к 1928 г. производство ДВС только достигло довоенного уровня, то в годы первой пятилетки, с началом индустриализации СССР оно резко возросло. На Харьковском паровозостроительном заводе (ХПЗ) вновь было развернуто производство стационарных и судовых дизелей. В связи с этим у завода возникли задачи и о крутильных колебаниях валопроводов.

Профессор Харьковского механико-машиностроительного института (ХММИ)¹ И. М. Бабаков предложил свой способ определения собственных частот крутильных систем. Для этого дифференциальные уравнения крутильных колебаний записываются в обратной форме. Метод основан на приближении не частотами (как у Толле), а формами колебаний. Иван Михайлович занимался этой проблемой с 1934 г. В ряде статей приводятся алгоритмы определения высших частот, и доказывается сходимость метода [3, с. 92-95].

Сотрудник ХЭТИ А. М. Данилевский² в 1937 г. предложил метод, основанный на приведении определителя уравнения частот к так называемой форме Фробениуса [4]. Это приведение может быть выполнено самими простыми средствами с достаточной для практики точностью и при большом числе степеней свободы требует в полтора раза меньше операций, чем знаменитый метод А. Н. Крылова [3, с. 92-95]. К сожалению, несмотря на свою эффективность, методы Бабакова и Данилевского не нашли широкого применения в расчетной практике заводских КБ.

В 1932 г. В Харькове был организован Украинский научно-исследовательский авиадвигательный институт (УНИАДИ), развернутый из лаборатории при Харьковском технологическом институте (ХТИ). Возглавил его бывший директор ХТИ Я. М. Майер (1894-1988) - ученый, специалист в области дизелестроения, доктор технических наук, профессор. После окончания ХТИ в 1924 г. Яков Моисеевич работал на Харьковском паровозостроительном заводе конструктором по дизелям, заведующим подотделом тепловых двигателей. Я. М. Майер – участник создания и доводки дизеля В-2. В 1929 г. назначается заведующим лаборатории ДВС при Харьковском институте промэнергетики, реорганизованной впоследствии сначала в НИИ ДВС, а затем в УНИАДИ.

В 1930 г. в лаборатории стал работать выпускник ХТИ Ю. А. Гопп. Он занимался динамическими расчетами двигателя и параллельно с 1930 г. по совместительству преподавал в ХТИ, сначала на кафедре теоретической механики, а затем на ряде других кафедр. Юрий Аркадьевич является автором целой серии научных работ по теории колебаний, в основном в них рассматриваются крутильные колебания валопроводов ДВС, включая вопросы определения параметров модели, виброгашения и др. [5, д. № 8881, л. 41]. Кроме того, ему принадлежит большая монография по демпфированию крутильных колебаний в двигателях - первая книга на русском языке, посвященная этой проблеме [6]. Она не только подытожила результаты многочисленных исследований, но и содержала оригинальные разработки автора [7, с. 4]. Работа Гоппа была премирована на конкурсе молодых ученых [5, д. 8881, л. 60].

¹ В 1930 г. ХТИ был разделен на пять институтов, в том числе ХММИ и ХЭТИ – Харьковский электротехнический институт

² Александр Михайлович Данилевский (1906-1941) – Харьковский ученый, погиб при оккупации Харькова в годы Великой Отечественной войны.

В 1937 г. УНИАДИ ходатайствовал перед ВАК при СНК СССР о присвоении Гоппу ученой степени кандидата технических наук без защиты диссертации. 27.04.37 ходатайство передано на рассмотрение Совета Московского авиационного института (МАИ) им. Серго Орджоникидзе. 25 мая 1938 г. Совет МАИ принял положительное решение по этому вопросу [5, д. 8881, л. 35]. В 1939 г. Ю. А. Гопп перешел на постоянную работу в ХММИ, сначала доцентом кафедры динамики и прочности машин, а затем на кафедру теории механизмов и машин. В сентябре 1941 г. он эвакуировался в Омск, где стал работать в Омском машиностроительном институте, организованном на базе Ворошиловградского вечернего машиностроительного института, созданного в 1939 г. при паровозостроительном заводе им. Октябрьской революции.

Работу над проблемами крутильных колебаний продолжил другой ученик Я. М. Майера - Л. И. Штейнвольф, выпускник специальности динамика машин 1939 г. Его учеба в аспирантуре была прервана войной и службой в армии. Работу над кандидатской диссертацией Лев Израилевич продолжил после демобилизации в 1945 г. В ней автор подробно рассмотрел применение маятникового antivибратора для гашения крутильных колебаний валопроводов ДВС³. В результате был предложен метод расчета нерезонансных вынужденных колебаний системы с присоединенным маятниковым демпфером и с учетом сопротивления системы. Для уточнения общих вопросов теории, методов расчета нерезонансных колебаний и эффективности воздействия маятниковых демпферов была использована экспериментальная установка. Это была первая установка для исследования маятниковых демпферов [8, с. 211]. Данная установка оказалась универсальным средством, позволяющим исследовать целый ряд вопросов крутильных колебаний. Успешная защита диссертации состоялась в 1947 г. [8].

В 1956 году в ХПИ была открыта Проблемная лаборатория по динамике машин, которую возглавил известный ученый в области математики и механики, профессор А. П. Филиппов⁴. Л. И. Штейнвольф был приглашен в эту лабораторию для организации и руководства научно-исследовательской группой силовых установок. Его научные интересы всегда были тесно связанными с практическими проблемами, и, в частности, с проблемами создания и совершенствовании транспортных машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Наряду с задачами анализа решались также и задачи нового направления – синтеза механических систем, управления спектром собственных частот [9, 10, 11]. В 1967 г. Л. И. Штейнвольф успешно защитил докторскую диссертацию на тему: «Динамика механических передач

³ В 1930-1950-е гг. маятниковые antivибраторы называли маятниковыми демпферами, хотя в них и не предусмотрено рассеяние энергии за счет трения.

⁴ Анатолий Петрович Филиппов (1899-1978) – академик АН УССР, профессор, заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин» ХПИ с 1948 по 1960 гг.

силовых установок тепловозов» [12]. В ней рассмотрены общие вопросы расчета свободных и вынужденных крутильных колебаний, переходных процессов, синтеза механических передач и расчета фрикционных автоколебаний. В работе также дан анализ существовавших тогда методов расчета собственных частот и форм колебаний. При расчете вынужденных колебаний рассмотрена замена нелинейного демпфирования эквивалентным линейным из условия равенства работ действительных демпфирующих сил и эквивалентных сил вязкого трения. В ходе работы были проведены динамические расчеты механических передач силовых установок тепловозов ТЭЗ, ТЭ10, и ТЭ40 производства Харьковского завода транспортного машиностроения имени В.А. Малышева и тепловозов 2ТЭ10Л, М62 и ТГ106 Луганского тепловозостроительного завода имени Октябрьской революции. В 1968 г. Л. И. Штейнвольфу присвоено ученое звание профессора по кафедре теоретической механики.

Научные исследования по различным проблемам динамики силовых передач транспортных машин выполнялись Л.И. Штейнвольфом по наиболее актуальным направлениям развития транспортной техники, на базе современных достижений математики, механики и кибернетики. Научная группа, которую возглавлял Лев Израилевич, отличалась высокой работоспособностью, в ней царила прекрасная творческая атмосфера. За годы существования в Проблемной лаборатории небольшого по составу коллектива группы, в нем подготовлено два доктора и 16 кандидатов наук. Привлеченный со студенческих лет для научной работы в группе Владимир Николаевич Карабан под руководством Л. И. Штейнвольфа стал кандидатом, а затем доктором технических наук, заведующим кафедрой теоретической механики.

Кандидатская диссертация В. Н. Карабана также была посвящена проблемам маятникового антивибратора. Объектом для его исследования стал новый тепловозный дизель Д-70, разработанный коллективом кафедры ДВС ХПИ под руководством Н. М. Глаголева. Эксплуатация дизеля Д-70 с генератором ГП-310 показала, что в рабочем диапазоне имеется несколько резонансных пиков крутильных колебаний. Поэтому В. Н. Карабаном в рамках подготовки кандидатской диссертации [7] было проведено расчетно-экспериментальное исследование валопровода этого дизеля с целью выяснения возможности применения для уменьшения амплитуд его крутильных колебаний маятникового антивибратора, закрепленного на свободном конце коленчатого вала. Поскольку установка обычного маятникового антивибратора полностью устранить опасные колебания не позволила, так как в рабочем диапазоне резонирует много гармоник, была разработана конструкция маятникового демпфера. Он оказался более эффективным средством для устранения крутильных колебаний в данной установке. Результаты расчета были уточнены торсиографированием. Предложенное устройство надежно с точки динамической прочности и

технологично в изготовлении. Введение двух маятников с трением не повлияло на работу двух других, сохраненных как антивибратор [13].

Важнейшим этапом научного творчества Л. И. Штейнвольфа и В. Н. Карабана стали исследования по нелинейным колебаниям в машинах, что связано с усложнением транспортных и боевых машин и повышенными требованиями к их работе при эксплуатации. Под его руководством В. М. Шатохиным были разработаны алгоритмы и программы, реализующие применение итерационного метода Ньютона-Канторовича для нелинейных интегральных уравнений, описывающих свободные и вынужденные колебания дискретных систем [14, 15]. Затем этот подход был развит для решения задач оптимизации и синтеза и исследования переходных режимов в силовых передачах транспортных машин [16, 17].



23 апреля 2009 г. исполнилось 70 лет со дня рождения *Владимира Николаевича Карабана* (1939-1995), известного ученого в области механики, динамики машин и прикладной теории колебаний. Выпускник специальности динамика и прочность машин (1962), ученик Л. И. Штейнвольфа. Доктор технических наук (1982), профессор (1983), заведующий кафедрой теоретической механики ХПИ (с 1977 г.), академик АН Высшей школы Украины. Научные исследования В. Н. Карабана посвящены различным проблемам динамики силовых передач боевых, транспортных и сельскохозяйственных машин. Ценность его научной работы заключалась в тесной связи с производством и постоянным внедрением результатов исследований в практику конструкторских бюро, занимающихся расчетами и доводкой силовых передач с ДВС. Владимир Николаевич ушел из жизни очень рано, в возрасте 55 лет.

В 1960-е годы в практику расчетов стало входить применение ЭВМ. Однако возможности машин были еще очень ограничены, поэтому долго определение собственных частот и форм колебаний проводилось с помощью различных приближенных методов. Так, например, в расчетах свободных колебаний приводов вспомогательных механизмов тепловоза, выполненных для ХЗТМ, рассматривается система с девятью степенями свободы [18]. Для проведения ручных расчетов по методу В. П. Терских или методу остатка Толле эта система весьма громоздка, поэтому расчеты осуществлялись на ЭЦВМ Урал-2. Сначала вручную с помощью калькулятора определялись параметры матриц жесткости и инерции, а затем применялась стандартная программа (СП) степенного метода в сочетании с понижением. При расчетах

данным методом определяются все собственные частоты, начиная с высшей. Поскольку при вычислениях накапливается ошибка, вычислительный процесс проводился, также начиная с низшей частоты. Для этого делалось обращение матриц уравнений. Контролем правильности счета являлось совпадение частот и форм исходной и обращенной матриц [18, с. 13].

Метод Терских мог применяться для проведения расчетов с помощью ЭВМ, однако в ходе расчета могло потребоваться вмешательство оператора, так как уравнение в форме цепной дроби представляет собой разрывную функцию частоты [19, с.107]. Большой вклад в компьютерную реализацию метода Терских внес А. П. Филиппов. В монографии [20] он описывает программу расчета собственных частот для разветвленной системы с 96 степенями свободы. Такая высокая для того времени размерность рассматриваемой системы делала метод цепных дробей конкурентоспособным и после распространения методов матричной алгебры.

Дальнейшее развитие вычислительной техники позволило решить полную проблему собственных значений и собственных векторов с помощью итерационных методов, что, хотя и не сразу, позволило отказаться от всех вышеизложенных методов расчета. Так в 1952 г. был вновь открыт метод вращений Якоби. Однако достаточно высокая его трудоемкость заставила математиков искать новые алгоритмы. В статье [19, с.108] Л. И. Штейнвольф обосновал применение для расчета собственных частот и форм крутильных колебаний QR-алгоритма, предложенного в 1961 г. В. Н. Кублановской и Дж. Френсисом. Этот алгоритм основан на преобразовании матрицы к треугольной форме и оказался эффективнее метода вращений Якоби. Однако для ЭВМ 1970-х годов ограничения по быстродействию и по объему памяти оставались существенны, например, машина М-222 позволяла рассматривать только системы не выше 26-го порядка [3, с. 96]. В связи с этим при решении задач синтеза или оптимизации колебательных систем, где задача анализа решается многократно, исследователю приходилось уменьшать порядок системы, выделяя в ней только часть спектра собственных частот [16].

Решение полной проблемы собственных значений существенно упростило задачи о свободных колебаниях линейных дискретных систем, особенно для цепных систем, для которых дифференциальные уравнения этих колебаний очень легко строятся в прямой форме. Наибольшей трудоемкости при этом требует заполнение вручную матриц инерции и жесткости системы уравнений. Поэтому с начала 1970-х годов под руководством Л. И. Штейнвольфа разрабатываются методы автоматического построения систем уравнений. В статье [21] рассматривается автоматическое построение дифференциальных уравнений колебаний в прямой форме для цепных линейных систем с помощью структурных матриц. Записав обратные структурные матрицы легко можно составить уравнения колебаний и в обратной форме [21, с. 7]. Применение аппарата структурных матриц для консерватив-

ных систем позволило уточнить ряд теорем теории колебаний, касающихся спектральных свойств дискретных систем [22, с. 18]. Дальнейшее развитие аппарата структурных матриц привело к созданию программного комплекса КИДИМ [23, 24], позволяющего автоматически строить математические модели, описывающие движение дискретных механических систем сложной структуры с произвольными связями. Комплекс основан на специально созданной системе компьютерной алгебры, формирующей уравнения движения по аналитическому описанию механической модели, и позволяет оперативно варьировать не только параметры системы, но ее структуру. Современное состояние теории колебаний и применяемых для их расчетов средств не требует выделения расчетов крутильных колебаний в отдельный класс задач.

Список литературы: 1. Крылов А.Н. Вибрация судов. т. X собрания трудов – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 403 с. 2. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. – 704с. 3. Ларин А. А. Развитие методов расчета крутильных колебаний в Харьковском политехническом институте с 1930 по 1970 годы // Вестник НТУ «ХПИ» Динамика и прочность машин, Харьков, 2007, вып. 22, С. 90-98 4. Данилевский А.М. О численном решении векового уравнения. Матем. Сб., 2 (44), 1937. – С. 169 -172. 5. Фонды архива Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» 6. Гопп Ю. А. Демпферы крутильных колебаний коленчатых валов быстроходных двигателей. – Харьков.: Гостехиздат, 1938. – 272 с. 7. Карабан В. Н. Исследование маятникового антивибратора с трением дис. ... канд. техн. наук.– Харьков, 1966.– 193 с. 8. Штейнвольф Л. И. Исследование маятникового демпфера крутильных колебаний коленчатых валов двигателей дис. ... канд. техн. наук.– Харьков, 1947.– 213 с. 9. Глазман И. М., Штейнвольф Л. И. Освобождение резонансно-опасных зон от собственных частот вибрационной системы варьированием ее параметров // Известия АН СССР. Сер. Механика и машиностроение.–1964.–№4.–С. 126-128. 10. Митин В. Н., Пономарев А. С., Штейнвольф Л. И. Синтез вибрационных систем при вынужденных колебаниях // Динамика и прочность машин.– Харьков: Вища школа.–1973.–Вып. 18.–С. 58-62. 11. Митин В.Н., Штейнвольф Л.И. Синтез дискретных вибрационных систем с максимально жестким спектром // Прикладная математика и механика.–1975.–т.39.–№4.–С. 46-54. 12. Штейнвольф Л. И. Динамика механических передач силовых установок тепловозов дис. ... докт. техн. наук.– Харьков, 1966.– 655 с. 13. Динамические расчеты синтеза и анализа приводов вспомогательных механизмов тепловоза с двигателем Д70, Отчет по НИР Тема № 7 ОП/362 Харьков, 1963, 178 с. 14. Карабан В.Н., Шатохин В.М., Штейнвольф Л.И. К вопросу применения итерационного метода для расчетов колебаний существенно нелинейных систем // Динамика и прочность машин.– Харьков: Вища школа.–1981.–Вып. 33.–С. 54-63. 15. Карабан В.Н., Шатохин В.М., Штейнвольф Л.И. Исследование вынужденных колебаний в приводах механизмов циклового действия // Теория механизмов и машин.– Харьков: Вища школа.–1983.–Вып.34.–С. 61-66. 16. Драгун С.В., Карабан В.Н., Штейнвольф Л.И. Оптимизация моделей силовых передач в динамических расчетах Проблемы машиностроения Вып. 17 1982 с. 66-70 17. Андреев Ю.М., Штейнвольф Л.И. Синтез нелинейных вибрационных систем по скелетным кривым с использованием теории чувствительности //Динамика и прочность машин. – 1984. – Вып. 40. С. 50-56. 18. Динамические расчеты приводов вспомогательных механизмов тепловоза. / Отчет по теме № 490П/171/67.– Харьков 1967. – 30 с. 19. Штейнвольф Л.И. Об алгоритмах расчета свободных крутильных колебаний на ЭЦВМ //Динамика и прочность машин. – 1967. – Вып. 6. С. 106-109 20. Филиппов А.П. Колебания механических систем. – К.: Наукова думка, 1965.– 456 с. 21. Митин В. Н., Штейнвольф Л. И. Структурные матрицы цепных вибрационных систем // Динамика и прочность машин.- Вып. 17. С. 3-7 22. Митин В. Н. Спектральные свойства и синтез цепных вибрационных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Харьков, 1975.– 19 с. 23.

Андреев Ю.М., Ларін А.О. Морачковский О.К. Система комп'ютерної алгебри для досліджень механіки машин. // *Машинознавство*, 2005, №7(95). С. 3-8. 24. Андреев Ю.М., Морачковский О.К. О динамике голономных систем твердых тел. // *Прикладная механика*, 2005, 41, №7. С. 130-138.

Поступила в редколлегию 22.04.09

УДК 621 (477)

С. О. МЕНЬШИКОВ, студент НТУ «ХП»

ЕНЕРГОМАШИНОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ: ІСТОРИКО-МЕТОДОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ

У статті проведено дослідження розвитку енергомашинобудування в Україні на тлі світового розвитку цієї галузі. Наводяться дані про будівництво і роки роботи енергомашинобудівних заводів, дається аналіз їх діяльності.

In this paper a study of Energy Machine Building in Ukraine on the global development of the industry. The data on construction and years of plants Energy Machine Building. But given the analysis of their activities.

Загальновідомо, що одним з перших механічних двигунів, який широко застосовувався у свій час, можна вважати водяне (гідравлічне) колесо. До того в більшості використовувалась м'язова сила людей та тварин. Також використовувались повітряні колеса, але вони не отримали такого розповсюдження через нестійкість у роботі, яка пов'язана з нестійкістю сил природи що приводять їх в дію. В техніці мануфактурного періоду основним двигуном стає водяне колесо, яке застосовується у всіх видах виробництва. Всі знаряддя, які раніше приводились в дію вручну чи силою тварин, наприклад ручні млини, насоси, ковальські міха і т. п., у мануфактурний період починають приводитись в дію за допомогою гідравлічного колеса. Гідравлічне колесо застосовували вже у країнах Стародавнього Сходу, у Стародавній Греції та Римі, але тільки у мануфактурний період водяне колесо стає головним двигуном у промисловості. Звичайно потужність водяного колеса не перевищувала кількох десятків кіловат, кількість обертів коливалась від 1 до 10 обертів за хвилину. ККД в залежності від конструкції коливався від 0,3 до 0,75. Прагнення збільшити потужність двигуна примушувала будувати гідроустановки великих розмірів. Великих успіхів у сфері будування гідротехнічних споруд домогся руський винахідник К. Д. Фролов (1726–1800). За його проектом будувались водозливні та підйомні вододіючі установки для копалень. А комплекс установок збудованих за його проектом на Алтаї у 1783–1789 рр. був найбільшою гідротехнічною спорудою у XVIII ст. і діяв довгий час і після смерті винахідника [1, с.84–86].