

Из истории естествознания
From the History of Science

DOI: 10.31857/S020596060016355-2

**ТЕРМОДИНАМИКА ДЖЕЙМСА УАТТА – ПРОИГНОРИРОВАНА
ИЛИ НЕ ПОНЯТА?**

МИТРОВИЧ Йован — профессор в отставке, Падерборнский университет; Германия, 33098, Падерборн, Варбургер-штрассе, 100; E-mail: mitrovic@tebam.de

СМЫК Александра Федоровна — Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., д. 64; E-mail: afsmyk@mail.ru

© Й. Митрович, А. Ф. Смык

При анализе генезиса развития термодинамики как науки в качестве отправной точкой обычно рассматривается теоретическая работа С. Карно, опубликованная в 1824 г. Карно изучил цикл идеального теплового двигателя и сформулировал условие его максимальной эффективности. В настоящей статье будет рассмотрен вклад Дж. Уатта в формирование фундаментальных понятий термодинамики в ходе его работы по усовершенствованию паровой машины Ньюкомена и разработке собственного парового двигателя. Показано, что Уаттом были впервые определены свойства термодинамических величин, такие как скрытая теплота и плотность пара. Авторы доказывают первенство Уатта в исследованиях зависимости давления насыщенного пара от температуры, в которых была обнаружена критическая точка при исчезновении скрытой теплоты. Эти результаты Уатта на много десятилетий опережают исследования термодинамического критического состояния Т. Эндрюса и Дж. Томсона. В статье также рассмотрено исследование Уаттом термодинамических циклов. Показано, что известный в истории термодинамики цикл Ренкина с влажным паром впервые изучил Уатт. Также он был первым ученым, кто ввел понятие объемной работы паровой машины, определяемое как произведение давления и объема, и разработал прибор, позволяющий измерять эту величину, индикатор давления. Рассмотрены результаты, полученные Уаттом, опережающие работы Дж. Прескотта Джоуля по охлаждению и конденсации пара в процессе расширения. В статье представлена интерпретация патента Уатта 1769 г., который имеет большое значение как первоисточник для последующего изучения и установления принципов преобразования энергии. Фактический материал, приведенный в статье, показывает, что научные исследования Уатта не включены в историю термодинамики, и это позволяет сделать вывод, что в истории термодинамики научные исследования Уатта остались не поняты, либо их просто не заметили.

Ключевые слова: Дж. Уатт, паровая машина, термодинамика, индикаторная диаграмма, скрытая теплота, давление пара, критическая точка, конденсация, отдельный конденсатор, патент Дж. Уатта, расширение пара, термодинамические циклы.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2020 г.

THERMODYNAMICS OF JAMES WATT – IGNORED OR NOT UNDERSTOOD?

MITROVIC Jovan – retired professor, University of Paderborn; Warburger Straße, 100, Paderborn, 33098, Germany; E-mail: mitrovic@tebam.de

SMYK Alexandra Fedorovna – Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Leningradsky prospekt, 64, Moscow, 125319, Russia; E-mail afsmysk@mail.ru

© J. Mitrovic, A. F. Smyk

Abstract: In the analysis of the development of thermodynamics as a science, the theoretical work of Sadi Carnot, published in 1824, is generally considered to be the starting point. Carnot studied the cycle of an ideal heat engine and formulated the condition for its maximum efficiency. In this article we examine James Watt's contributions to the formation of fundamental concepts of thermodynamics, made in the course of his work on improving the Newcomen engine and developing his own steam engine. It is shown that Watt was the first to characterize thermodynamic properties such as latent heat and vapor density. The authors prove Watt's priority in the studies of the dependence of saturated steam pressure on temperature, in which a critical point was found when the latent heat disappears. These results of Watt anticipated by many decades the studies on the thermodynamic critical state by Th. Andrews and J. Thomson. The article also discusses Watt's research on thermodynamic cycles. It is shown that he was the first to study the Rankine cycle with superheated steam, known from the history of thermodynamics. Watt was also the first scientist to introduce the concept of a steam engine's volumetric work as the product of pressure and volume, and developed a device, the steam pressure indicator, to measure its value. We show the results obtained by Watt with steam to be considerably ahead of Prescott Joule's work on the cooling and condensation of gases during expansion. The article presents an interpretation of Watt's 1769 patent that is very important as the primary source for a subsequent study and establishment of the principles of energy conversion. The factual material presented in this article suggests that Watt's scientific research have not been properly understood or simply went unnoticed.

Keywords: James Watt, steam engine, thermodynamics, indicator diagram, vapor pressure, latent heat, critical point, condensation, separate condenser, Watt's patent, steam expansion, thermodynamic cycles.

For citation: Mitrovic, J. and Smyk, A. F. (2021) Termodinamika Dzheimsa Uatta – proignorirovana ili ne ponjata? [Thermodynamics of James Watt – Ignored or not Understood?], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 42, no. 3, pp. 397–442, DOI: 10.31857/S020596060016355-2

Когда я увидел в первый раз Джеймса Уатта, я обратился к нему, ожидая встретить не больше как техника, и, к удивлению своему, нашел ученого... В его руках все становилось началом научной работы, все превращалось в науку...

*Дж. Робисон*¹

Введение

Небольшая по объему книга французского инженера и ученого С. Карно, опубликованная в 1824 г., считается отправным пунктом в развитии термодинамики как науки². Эта точка зрения, высказанная величайшими учеными, среди которых были У. Томсон (лорд Кельвин), У. Дж. Ренкин и Р. Клаузиус, прочно укоренилась в истории физики и не требует пересмотра. Известно, что работа Карно оставалась практически незамеченной учеными в течение десяти лет после ее опубликования и была «открыта» благодаря другому французскому инженеру, Э. Клапейрону, в 1834 г.³ Позже появились публикации Томсона, Ренкина и Клаузиуса, в которых работе Карно также уделялось большое внимание. В период с 1840 по 1860 г. многочисленные статьи в области феноменологической термодинамики и молекулярно-кинетической теории создали научную основу современной термодинамики.

Этот сюжет неоднократно становился предметом внимания историков науки. Т. Кун и К. Смит показали, что за упомянутый период 1840–1860 гг. как минимум двенадцать исследователей всесторонне занимались центральными вопросами термодинамики и, в частности, изучением преобразования и сохранения энергии⁴, при этом Э. Хиберт полагал, что временной

¹ Цит. по: *Каменский А. В.* Джеймс Уатт. Его жизнь и научно-практическая деятельность. СПб.: Тип. газеты «Новости», 1891 (Жизнь замечательных людей. Биографическая библиотека Ф. Павленкова).

² *Carnot, S.* Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. Paris: Bachelier, 1824 (рус. пер.: *Карно С.* Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу. М.; Л.: Гостехиздат, 1923).

³ *Clapeyron, É.* Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur // *Journal de l'École royale polytechnique*. 1834. Т. 14. Cahier 23. P. 153–190. См. также: *Смык А. Ф.* Теория тепловой машины в трудах С. Карно и Б. Клапейрона // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2019. № 1 (19). С. 22; *Смык А. Ф., Кузьмина Н. Б.* Аналогии в построении феноменологической теории идеальной тепловой машины // *История науки и техники*. 2019. № 6. С. 3.

⁴ *Kuhn, Th.* Energy Saving as an Example of Simultaneous Discovery // *Critical Problems in the History of Science. Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin*, September 1–11, 1957 / M. Clagett (ed.). Madison: University of Wisconsin Press, 1959. P. 321–356; *Smith, C. W.* William Thomson and the Creation of Thermodynamics: 1840–1855 // *Archives for the History of Exact Sciences*. 1977. Vol. 16. P. 231–288.

промежуток, который рассматривается в работах Куна и Смита, слишком короток для того, чтобы на основе его анализа делать надежные и далеко идущие выводы⁵. Смит в своем исследовании показал, что вклад Томсона в формулировку второго закона термодинамики основан на использовании в качестве основных источников работ Карно и Клапейрона. Более поздняя работа Р. Фокса посвящена изучению влияния «принципа расширения» — принципа использования дальнейшего расширения рабочего вещества в паровом двигателе после прекращения подачи пара, выдвинутого Уаттом, на работу Карно⁶. Также Фокс исследовал научное окружение и круг общения Карно в период создания его «Размышлений о движущей силе огня...». Последнее существенно дополняет тему, затронутую Куном в 1959 г. Как показывает Фокс, Карно ни в коем случае не работал в изоляции, как принято думать, а общался со своим научным окружением, в результате чего происходил взаимный обмен идеями. Более того, после детального анализа работы Карно Фокс обнаружил, что Карно использовал данные Уатта, не ссылаясь на него. Фокс сравнил числа в таблице из работы Карно 1824 г. с числами в таблице Уатта, опубликованной в его патенте в 1782 г., в котором некоторые числа были неверны. Фокс заметил, что таблица Карно содержит те же самые неверные числа⁷.

В настоящей статье будет рассмотрен вклад Уатта в формирование фундаментальных понятий термодинамики в ходе его работы по усовершенствованию паровой машины Т. Ньюкомена и разработке собственного парового двигателя. Идеи и работы Уатта в этой области почти не упоминаются в литературе, несмотря на их историческое значение⁸. В своей работе авторы статьи опираются в первую очередь на патенты Уатта и на изложение его идей в работах Дж. Робинсона

1. Термодинамический анализ парового двигателя

1.1. Введение

Интерес Уатта к изучению преобразования тепловой энергии возник примерно в 1759 г. Через два года, в 1761 г., он начал эксперименты с паром. Во-первых, он изучал силовое действие пара с помощью шприца, подсоединенного к миниатюрному котлу Д. Папена. Из этих экспериментов он узнал, что пар, действующий на поршень шприца, расширяется и перемещает

⁵ Hiebert, E. Commentary // *Critical Problems in the History of Science...* P. 391–398.

⁶ Fox, R. Watt's Expansive Principle in the Work of Sadi Carnot and Nicolas Clément // *Notes and Records of the Royal Society of London*. 1970. Vol. 24. No. 2. P. 233–253.

⁷ Fox, R. Anmerkungen zum Text der "Betrachtungen" // *Carnot, S. Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen*. Braunschweig; Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 1988. S. 95; *Carnot, S. Reflexions on the Motive Power of Fire. A Critical Edition with the Surviving Scientific Manuscripts*. Manchester: Manchester University Press; New York: Lilian Barber Press, Inc., 1986. P. 154.

⁸ Исключением являются работы, указывающие на достижения Уатта-исследователя: Конфедератов И. Я. *Джеймс Уатт*. М.: Наука, 1969; Гвоздецкий В. Л. *Формирование теории паровой машины* // ВИАТ. 1987. № 2. С. 102–112.

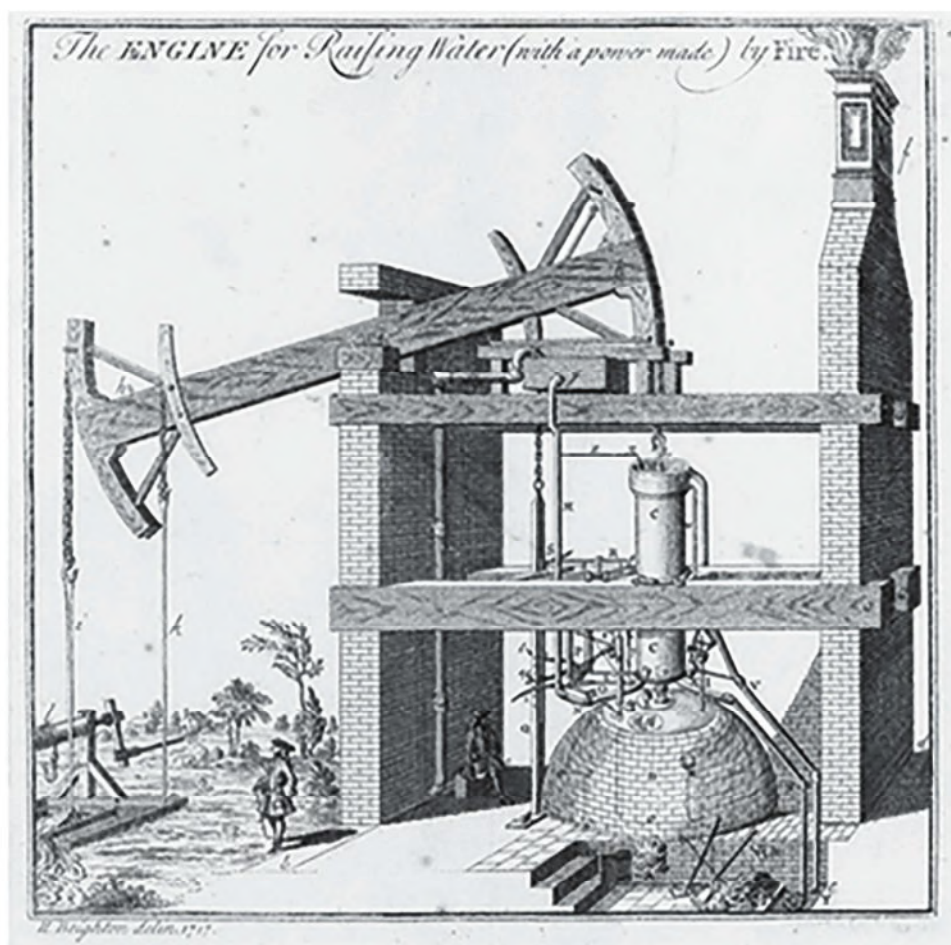


Рис. 1. Паровой двигатель Т. Ньюкомена, усовершенствованный Г. Бейтоном, 1717 г.

поршень, нагруженный определенным весом⁹. Для перемещения этого веса требовалось давление пара выше атмосферного. Уатт считал опасным любое повышение давления выше атмосферного и поэтому не продолжил эксперименты в этой области давления. Однако благодаря им и благодаря его участию в работах по восстановлению парового двигателя модели Т. Ньюкомена в 1763–1764 гг., который находился в Университете Глазго, у Уатта появились определенные идеи о том, как улучшить старые паровые двигатели.

Состояние парового двигателестроения до Уатта хорошо задокументировано в литературе, и мы предполагаем, что читатель обладает соответствующей информацией¹⁰. На рынке господствовал двигатель Ньюкомена (рис. 1),

⁹ Smiles, S. *Lives of Boulton and Watt*. London: John Murray. 1865. P. 120–121.

¹⁰ Stuart, R. *A Descriptive History of the Steam Engine*. London: Whittaker, Treacher, and Arnot, 1829; Радциг А. А. *История теплотехники*. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936; Радциг А. А. *Джеймс Уатт и изобретение паровой машины*. Петроград: Научное химико-техническое изд-во. Научно-технический отдел ВСНХ, 1924.

принцип работы которого был описан во многих трактатах о паровых двигателях. Пар, образующийся в котле при давлении немного выше атмосферного, поступает в поршневую камеру, затем конденсируется путем впрыскивания холодной воды в паровую камеру. При конденсации пара давление в камере уменьшает и поршень идет вниз. Поступательное движение поршня вниз тянет в том же направлении одно плечо балки. Движение вверх другого плеча балки ведет к подъему воды из угольной шахты. В самом начале своей работы над улучшением работы парового двигателя Ньюкомена Уатт выделил две существовавшие проблемные области — это геометрическая диспропорция и тепловые свойства материалов.

Геометрия парового цилиндра, выраженная как отношение площади поверхности к объему цилиндра, $A/V = 4/d + 2/L \sim 1/d$, d — диаметр и L — длина цилиндра, была неблагоприятной для теплопередачи. Это соотношение можно рассматривать как величину площади теплопередачи на объем жидкости, занимающей пространство цилиндра. Отношение A/V тем больше, чем меньше диаметр цилиндра. По словам Уатта, этот диаметр d был слишком мал для эффективной работы двигателя. При прочих равных параметрах цилиндр с меньшим d отводит больше тепла из жидкости на единицу объема и — в случае парового двигателя — вызывает большие тепловые потери жидкости. Такая зависимость была вновь открыта спустя столетие, когда утвердилась идея удельной площади теплопередачи. Так или иначе, Уатт обнаружил, что котел не может обеспечить цилиндр достаточным количеством пара. Он построил модель побольше и провел научные эксперименты, результаты которых будут рассмотрены ниже.

Вторая проблема, с которой столкнулся Уатт, заключалась в том, что у его модели паровой цилиндр был изготовлен из латуни, материала с теплопроводностью, примерно в два раза большей, чем у чугуна, используемого в больших двигателях. Таким образом, в такой модели были неизбежны относительно более высокие тепловые потери с поверхности цилиндра. Уатт попытался использовать для цилиндра другие материалы, например дерево, но другие недостатки перевесили преимущества этой замены, и идея не получила дальнейшего развития.

В связи с проделанным Уаттом анализом модели Ньюкомена интересно обратить внимание на слова Ренкина при описании ряда конструкций паровых машин в хронологическом порядке с акцентированием на их эмпирических корнях. Время Уатта он описал довольно восторженно, заявив:

...затем наступило время, когда наука за несколько лет достигла большего, чем простой эмпирический прогресс за девятнадцать столетий. В 1759 г. Робисон обратил внимание Джеймса Уатта на паровую машину и в течение нескольких последующих лет проводил различные эксперименты над свойствами пара. В 1763 и 1764 гг. Уатт, занимаясь ремонтом небольшой модели двигателя Ньюкомена (принадлежавшей Университету Глазго и с тех пор хранящейся этим университетом как самая драгоценная реликвия), заметил различные

дефекты этой машины и экспериментально установил их причины. Уатт с самого начала взялся за научную работу. Он изучал законы...¹¹

Однако, признав вклад Уатта во введении, Ренкин не обращает далее внимания на это в основной части своей книги.

1.2. Принцип преобразования энергии Дж. Уатта

Принцип работы устройства Уатта для преобразования энергии показан на рис. 2. Представленная технологическая схема соответствует описанию в его патенте 1769 г.¹² При подаче тепловой энергии (тепла) в котел рабочая жидкость (вода) преобразуется в пар. Из-за присутствия пара Уатт не был уверен, что слово «тепло» адекватно отражает способность среды выполнять работу. Он попытался включить в эти соображения также и давление, но без особого успеха. Однако интуиция Уатта в дальнейшем оказалась верной, поскольку давление можно понимать как механическую (потенциальную) энергию жидкости на единицу ее объема. Умножение давления p на удельный объем v жидкости смещает величину давления в сторону более высокого качества, в сторону качества энергии. Произведение pv изменяется в любом реальном процессе так же, как и в паровом двигателе, единственным исключением является изотермический процесс идеальной жидкости.

По этим причинам представляется целесообразным следовать интуиции Уатта и использовать вместо тепла потенциал (*potentia* (лат.) — энергия) рабочего тела. Рабочее вещество высокого потенциала (пар) вводится в паровой цилиндр, где его потенциал частично преобразуется в механическую энергию (работу). После этого пар достигает отдельного конденсатора, где конденсируется. Затем конденсат подается в котел с помощью насоса. Цикл рабочего вещества, таким образом, замкнут. На своем пути внутри двигательной установки рабочее вещество подвергается воздействию различных условий и претерпевает различные изменения. Для выполнения замкнутого цикла сумма изменений любой физической величины рабочего вещества должна быть равна нулю. Это аналогично равновесию механической системы сил; оно известно как принцип восстанавливаемости.

Этот цикл можно назвать *циклом Уатта*, он состоит из следующей последовательности процессов: в котле рабочее вещество (вода) испаряется и его потенциал возрастает при постоянном (почти атмосферном) давлении. Образовавшийся пар направляется в паровой цилиндр. В трубе, соединяющей эти два компонента, могут возникнуть некоторые потенциальные потери (из-за перепада давления и / или теплопередачи в окружающую среду), о чем свидетельствует наклон линии рабочего вещества. В идеальном случае, без потерь, будет идти пунктирная линия. В паровом цилиндре происходит

¹¹ Rankine, W. J. M. A Manual of the Steam Engine and other Prime Movers. 4th ed. London: Charles Griffin and Company, 1869. P. XX–XXI.

¹² Specification of Patent, January 5th, 1769, for a New Method of Lessening the Consumption of Steam and Fuel in Fire Engines // Muirhead, J. P. The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt. London: John Murray, 1854. Vol. 3. P. 10–16.

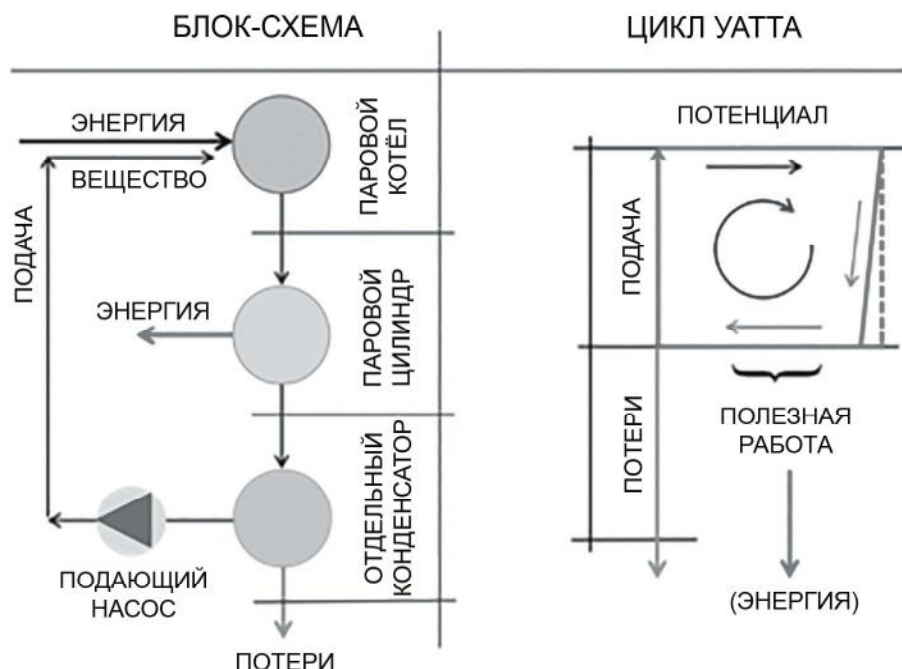


Рис. 2. Технологическая схема преобразования энергии в соответствии с патентом Дж. Уатта 1769 г.

требуемое преобразование потенциала, вызывающее падение потенциала (в идеале без потерь); энергия, соответствующая этому падению потенциала, покидает двигательную установку в качестве полезной энергии. Наконец, в отдельном конденсаторе происходит конденсация пара, которая может происходить при постоянном давлении / температуре. Конденсат при температуре конденсации (или слегка переохлажденный) закачивается обратно в котел, в то время как тепловая энергия (скрытая теплота конденсации) покидает оборудование в виде отходов. Не исключено, что первый двигатель Уатта не был сконструирован с обратным потоком конденсата и рабочее вещество выполняло открытый процесс, состоящий всего из трех ступеней. Это могло бы побудить Карно представить поток жидкости в паровом двигателе как открытый процесс. В идеальном процессе Уатта тепловая энергия, соответствующая внутренней энергии (ощущаемой теплоте) конденсата, выходящего из конденсатора, постоянно циклически взаимодействует с рабочим веществом (рис. 3).

В этом заключается цикл преобразования энергии Уатта. Он прекрасно вписывается в ньютоновскую иллюстрацию взаимодействия фундаментальных элементов материи. В зависимости от изменения расстояния между элементами взаимодействие меняется от отталкивания к притяжению (и наоборот). В этом контексте мы приводим знаменитую аналогию И. Ньютона:

И как в алгебре, где положительные величины исчезают и прекращаются, начинаются их отрицательные величины, так и в механике, где притяжение прекращается, должна преуспевать отталкивающая добродетель¹³.

Заменяя положительные и отрицательные величины Ньютона в его алгебре различными видами энергии, мы можем утверждать, что в термодинамике, где один вид энергии прекращается, другой вид энергии должен «преуспеть». Мы признаем переход одного вида энергии в другой, в то время как полная энергия системы остается сохраненной.

Рабочее вещество совершает процессы, ограниченные двумя температурами: при более высокой температуре, которая является максимальной температурой процесса (в котле), рабочее вещество обладает наибольшим потенциалом, тогда как потенциальный минимум совпадает с наименьшей температурой процесса (в отдельном конденсаторе). Необходимо признать, что Уаттом впервые было введено представление о двух границах циклического процесса (цикла Уат-

та) с точки зрения температуры. Карно был хорошо знаком с изобретениями Ньюкомена и Уатта, пользовался другими английскими источниками и сведениями из «Британской энциклопедии», когда приступил к теоретическому описанию работы тепловой машины. В своей работе 1824 г. Карно исследовал цикл идеализированной тепловой машины и сформулировал принцип, согласно которому непременным условием превращения теплоты в работу является наличие двух резервуаров — нагревателя и холодильника, т. е. существование разности температур. С другой стороны, мы можем говорить о двух потенциальных уровнях рабочего вещества и преобразовании энергии, происходящем при движении, например, жидкости от более высокого потенциала к более низкому.

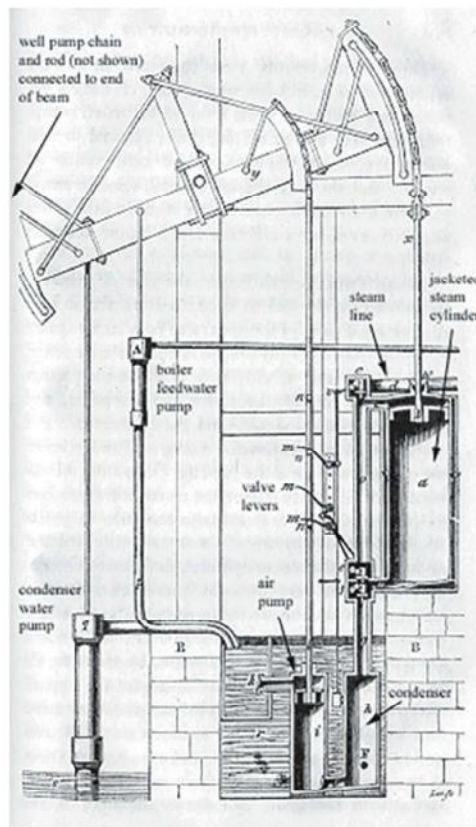


Рис. 3. Паровая машина Уатта с отдельным конденсатором согласно патенту 1769 г., построена в 1774 г. Водяной котел на чертеже не показан (Stuart. Descriptive History of the Steam Engine... P. 114)

¹³ Newton, *J. Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. 4th ed. London: Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's, 1730. P. 395.

Принцип Уатта применим не только к тепловым двигателям, но распространяется и на другие виды преобразования энергии. Например, если заменить паровой цилиндр паровой турбиной, совмещенной с электрогенератором, то получится современный вариант термоэлектрической установки с непрерывным круговоротом рабочего вещества. Аналогичным образом, заменив котел водяной плотиной, паровой цилиндр гидротурбиной, отдельный конденсатор низкопотенциальным бассейном (руслом реки) и используя воду без смены фаз, мы получаем гидроэлектростанцию. Этих двух примеров достаточно, чтобы сделать следующий вывод: *в своем патенте 1769 г. Уатт запатентовал не паровой двигатель, как обычно утверждают, а принцип преобразования энергии общего действия.*

Уатт создал сначала в лабораторных условиях, а затем воплотил в промышленных масштабах термодинамический цикл, выполняемый рабочим веществом (рис. 2, справа). Если мы посмотрим на циклическое движение рабочего вещества в установке Уатта (рис. 2, справа), то увидим, что его идеи опередили идеи Карно, Клапейрона и их последователей более чем на полвека. Уатт воплотил свой цикл на практике задолго до 1796 г. — года рождения Карно и уже продал сотни своих двигателей до того, как Карно и его последователи приступили к теоретическим исследованиям условий течения жидкости в различных стадиях цикла Уатта. Однако Уатт не оставил никаких письменных свидетельств по этому вопросу, поскольку он использовал другой язык для выражения своих идей, это видно из чертежа его машины (см., например, рис. 3). В качестве доказательства можно упомянуть только одну деталь на этом чертеже: Уатт обволакивал паровой цилиндр рубашкой из пара той же температуры и в зависимости от взаимодействия паров в цилиндре и в рубашке мог использовать различные состояния пара в цилиндре во время работы двигателя. Если, например, пары в рубашке и в цилиндре не взаимодействовали термически, то это соответствовало адиабатическим условиям процесса в цилиндре во время работы двигателя. Если бы мы в этом случае пренебрегли вязкостью жидкости (чего Уатт не сделал по понятным причинам), то пар в цилиндре изменил бы свое состояние изотропийно. С другой стороны, когда осуществлялось тепловое взаимодействие, процесс расширения пара внутри цилиндра был почти изотермическим. В книге Карно описаны процессы изотермического и адиабатного расширения и сжатия, но имя Уатта не упоминается.

Цель настоящей работы — показать, что Уатт был не только превосходным инженером-механиком, но и ученым и философом первого ранга, обладавшим глубокими теоретическими (философскими) знаниями своего времени. Только сочетание техники и философии было тем необходимым и достаточным условием, которое позволило ему осуществить намеченный план. Уатт, без всякого сомнения, является ученым, создавшим основы термодинамики и способствовавшим ее быстрому развитию. Уильям Томсон однажды сказал: «...термодинамика научилась большому у паровой машины, чем паровая машина научилась у термодинамики». В этой фразе содержится намек на достижения Уатта. К области термодинамики мы относим любой процесс, в котором температура не постоянна, а изменяется в пространстве и

во времени, вызывая изменения физических свойств подпространств, участвующих в этом процессе. Однако в истории физики термодинамика Уатта игнорируется или, скорее, не понимается. Уатт пытался понять взаимосвязь между потреблением угля и мощностью паровой машины Ньюкомена (рис. 1), что было задачей с четко определенными целями. Одних только теоретических рассуждений ему казалось недостаточно для получения окончательных результатов. Он хотел понять истинную эффективность двигателя, которая могла бы помочь ему спроектировать и построить свои собственные двигатели. Он не считал прямой путь теоретических расчетов подходящим для решения поставленного вопроса и достижения последовательных результатов, вместо этого он сделал промежуточный шаг, создав модель двигателя для экспериментальных исследований, основанную на его теоретических знаниях. Результаты, полученные с помощью этой модели, затем должны были найти свое воплощение на практике. Уатт рассматривал свою модель не как промышленный паровой двигатель, а как инструмент, который должен быть усовершенствован. Модель работала как продолжение теории, которая представляет и описывает объект. Современники же Уатта рассматривали эту модель не как объект научного исследования, а как результат деятельности техника без научного образования. Для того, чтобы изменить эту точку зрения, нужно было признать, что эксперимент и теория в науке неразрывно связаны.

1.3. Тепловые потери паровой машины Ньюкомена

При более тщательном изучении работы ньюкоменовской модели парового двигателя Уатт пришел к выводу, что тепловые потери всей двигательной установки могут быть уменьшены. Он исследовал причины этих потерь на основе принципа неразрушимости энергии, который был сформулирован еще до того, как появилась наука термодинамика: «Все, что существует, будь то материя или сила и в какой бы то ни было форме, неразруσιμο, кроме как бесконечной силой, которая создала его»¹⁴. Руководствуясь этой концепцией, Уатт предпринял соответствующие изменения в основных компонентах модели двигателя Ньюкомена, в частности в котле для нагревания воды и паровом цилиндре, пытаясь обнаружить причины потерь и уменьшить тепловые потери.

1.3.1. Тепловые потери водяного котла

При осмотре водяного котла Уатт сделал вывод, что для испарения воды огнем главным образом должна нагреваться поверхность котла, контактирующая с водой, а не поверхность, контактирующая с паром¹⁵. Количество

¹⁴ Thurston, R. H. A History of the Growth of the Steam-Engine. 2nd ed. New York: D. Appleton and Company, 1886. P. 433.

¹⁵ Robison, J. A System of Mechanical Philosophy. In 4 vols. / D. Brewster (ed.). Edinburgh: Printed for John Murray, London, 1822. Vol. 2. P. 108.

испарившейся воды зависело от количества тепла, полученного от смоченной поверхности котла, а не от поверхности, открытой воздуху. Смоченная поверхность должна быть по возможности большой, поэтому Уатт увеличил поверхность нагрева котла, сделав дымоходы через него¹⁶. Этим усовершенствованием Уатт предвосхитил появление спустя десятилетия концепцию компактных теплообменников. Тепловыделение из котла в окружающую среду было для Уатта потерей тепла, которую нужно было предотвратить, изолируя не только все горячие части котла, подвергающиеся воздействию холодного воздуха, с помощью материалов с низкой теплопроводностью, но и всю установку двигателя; его идея состояла в том, чтобы достичь почти адиабатических условий. Что касается потерь тепла в окружающую среду, то Уатт мог руководствоваться законом охлаждения Ньютона¹⁷, хотя он и не упоминал этот закон прямо. В связи с адиабатическим процессом отметим, что Карно в своей теории 1824 г. рассматривал адиабатические процессы в идеальной тепловой машине. Но заслуга Уатта, который сначала в лабораторных условиях, а затем в промышленных масштабах осуществил адиабатические процессы с рабочим веществом, к сожалению, в книге Карно не упоминается.

Для уменьшения тепловых потерь парового котла Уатт также разработал и запатентовал «дымопоглощающую печь», в которой дымовые газы, выделяющиеся из горящего угля, пропускались над уже раскаленным углем и полностью сгорали¹⁸. Таким образом, он предотвратил выход более летучих (с низкой температурой кипения) веществ из котла несгоревшими, тем самым снизив тепловые потери. Той же обработке подвергались и не полностью сгоревшие породы, которые таким образом осуществляли полные реакции и выделяли в печи тепло, которое в противном случае было бы потеряно. Анализ тепловых потерь котла является областью деятельности подготовленного специалиста, которая охватывает все виды теплопередачи (конвекцию, проводимость, тепловое излучение) в химически активных системах сложной геометрии. Уатт не мог ничего заимствовать из научной литературы, так как соответствующие знания просто отсутствовали в его время. Он должен был генерировать совершенно новые идеи и анализировать их применимость на практике. Кроме того, Уатт разработал и построил котел, который позволял измерять количество воды, испарившейся за заданный промежуток времени, что давало возможность рассчитывать количество пара, используемого в каждом такте двигателя. Такая информация была необходима для теплового анализа парового цилиндра.

1.3.2. Тепловые потери парового цилиндра

Результаты, достигнутые с помощью усовершенствования котлов и теплоизоляции, не оправдали ожиданий Уатта и вызвали у него чувство

¹⁶ *Smiles. Lives of Boulton and Watt... P. 124.*

¹⁷ Закон охлаждения Ньютона гласит, что скорость потери тепла телом прямо пропорциональна разнице температур между телом и окружающей средой.

¹⁸ *Thurston. A History of the Growth of the Steam-Engine... P. 125.*

неудовлетворенности. Поэтому он сосредоточил свое внимание на следующем компоненте двигательной установки — паровом цилиндре. Из общих соображений Уатт сделал вывод, что тепловые потери парового цилиндра будут иметь гораздо большее значение, чем потери водяного котла. Эта точка зрения основывалась на том факте, что количество воды в виде насыщенного пара могло нагреть гораздо большее количество холодной воды. Из этого открытия он заключил, что пар должен быть большим резервуаром тепла и любая потеря пара означала соответствующую потерю топлива. Потери пара должны быть уменьшены, если стремиться к уменьшению расхода топлива при той же мощности двигателя. Кульминацией этого представления стала концепция отдельного конденсатора. Величину расхода воды в котле, равную количеству пара, подаваемого в цилиндр, Уатт сравнил с минимумом пара, необходимого для работы двигателя. Этот минимум он получил как количество пара, равное одному заполнению цилиндра для совершения одного хода двигателя. Таким образом, он измерил фактический расход пара в единицах теоретического минимума. Обозначая измеренный расход пара $M_S = \rho_S V_S$ и количество пара минимального $M_{Smin} = \rho_S V_{CYL}$, Уатт получил:

$$\frac{M_S}{M_{Smin}} = \frac{V_S}{V_{CYL}} \approx 4, \quad (1)$$

где M_S и V_S , M_{CYL} и V_{CYL} обозначают соответственно массу и объем пара (S) и цилиндра (CYL). Уатт получил это значение из теоретического и экспериментального анализа работы парового двигателя; это соотношение важно не только для дальнейшего развития паровых двигателей, но и для экономических оценок использования энергетических ресурсов (угля). На основании полученного соотношения Уатт оценил потенциальную экономию угля, или «увеличение» получаемой от угля энергии, в 75 %. Этот вывод может рассматриваться и как формулировка закона сохранения энергии, и как необходимое условие рационального использования энергии угля, связанное с предотвращением любой бесполезной конденсации пара. Чтобы избежать последнего и сделать паровую машину более эффективной, Уатт пришел к выводу, что паровой цилиндр должен быть таким же горячим, как и пар, который в него входит. Однако без охлаждения цилиндра и конденсации пара падение поршня и совершение полезной работы были невозможны. Уатт наблюдал в ходе работы паровой машины, что огромная конденсация пара происходит расточительно как раз во время заполнения холодного цилиндра паром, т. е. во время движения поршня вверх. Он пришел к выводу о том, что существуют два процесса с противоположно направленными действиями:

а) для достижения большой разности давлений, необходимой для падения поршня, требуется низкое давление в цилиндре, что возможно с помощью охлаждающей воды, которая впрыскивается в цилиндр;

б) охлаждение при таких условиях не ограничивается только конденсацией пара, как следовало бы, а охлаждается вся масса цилиндра, что невыгодно для следующей рабочей ступени, когда в цилиндр снова подается

свежий насыщенный пар и давление внутри цилиндра должно выравниваться с внешним, атмосферным давлением.

Важно отметить, что эти два положения, четко сформулированные Уаттом, являются существенными для работы парового двигателя, но они исключают друг друга, когда должна быть достигнута максимальная мощность пара. С исторической точки зрения описательный анализ Уатта представляет собой первое термодинамическое моделирование теплового процесса, соответствующее этому историческому периоду (около 1765 г.). Работ по теплопередаче со сменой фаз, из которых Уатт смог бы почерпнуть необходимые ему знания, было опубликовано очень мало. Известны были закон охлаждения Ньютона (1701) и некоторые весьма неполные представления о теплопроводности Гийома Амонтона (1663–1705). Следовательно, Уатту приходилось формулировать почти все самостоятельно.

1.4. Некоторые детали теплового анализа парового цилиндра Уатта

Вряд ли нужно что-то менять в анализе Уатта, если мы оцениваем его работу на основе современного состояния знаний. Один из способов квалифицировать его анализ — предоставить фактические основы в соответствии с его словесными описаниями и выявить причины бесполезного потребления пара. Наши рассуждения должны также обеспечить верификацию мысли Уатта и выявить возможные слабости и недостатки его выводов.

1.4.1. Конденсация пара в цилиндре

Физические процессы, происходящие внутри цилиндра и связанные с потерями тепла при конденсации, в соответствии с описанием Уатта представлены на рис. 4. Показана левая сторона вертикального поперечного сечения парового цилиндра. Поршень движется вверх со скоростью w ; в положении M расстояние от поршня до дна цилиндра обозначается L . Пространство под поршнем заполнено паром, который конденсируется на стенке цилиндра. Конденсат образует на поверхности цилиндра замкнутую пленку, толщина которой увеличивается с увеличением расстояния z от поршня. По соображениям простоты предполагается, что обращенная вниз поверхность поршня свободна от конденсата. Над поршнем находится атмосферный воздух. Верхняя сторона поршня двигателя Ньюкомена обычно покрывалась слоем воды, который использовался для придания поршню герметичности; этот слой воды не учитывался. В движущейся системе координат с началом координат, закрепленном на нижней стороне поршня, мы можем аппроксимировать теплопередачу через пленку конденсата, принятую за ламинарную, теорией Нуссельта. Оставляя детали этой теории в стороне, мы будем использовать только некоторые из ее конечных результатов, необходимых для наших целей; мы выражаем тепловой поток на поверхности стены q_w ,

$$q_w = C_Z^{-1/4} \quad (2)$$

$$C = (g \rho_l h_v k_l^3 / (4 \mu_l))^{1/4} \Delta T_{SF}^{3/4}, \quad (3)$$

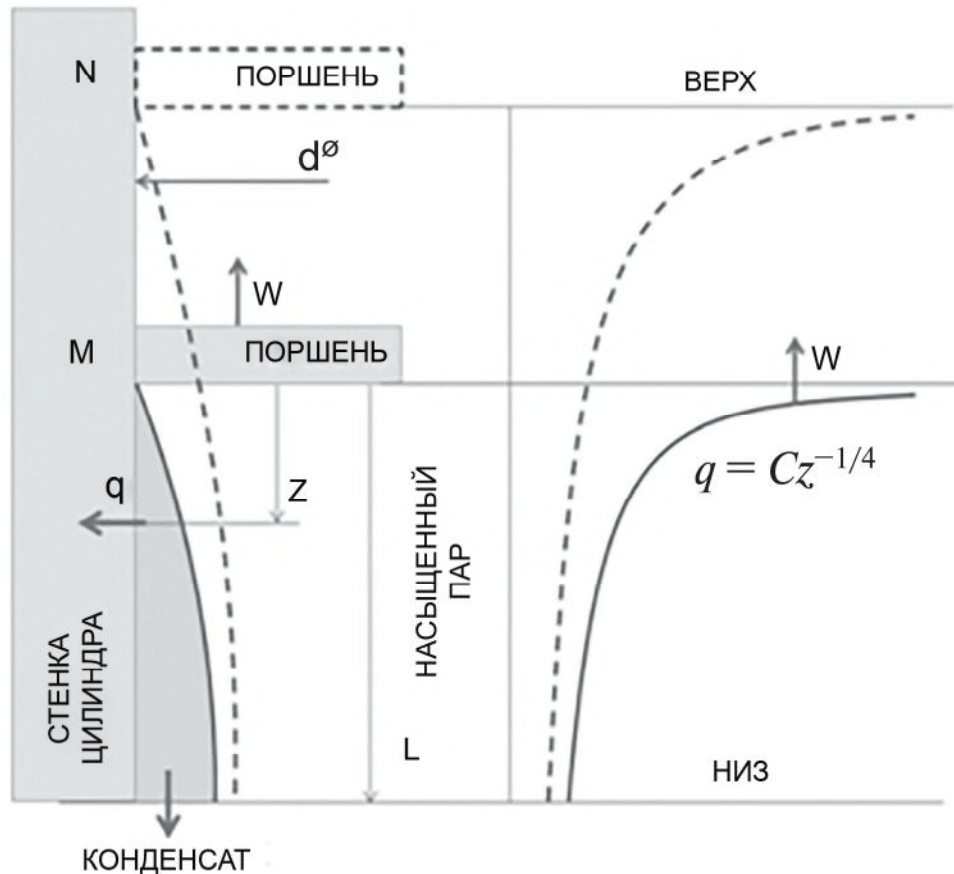


Рис. 4. Схема конденсации пара в цилиндре при подъеме поршня

где ΔT_{sw} — разность температур по всей пленке конденсата и h_{vl} — скрытая теплота конденсации пара. Другие символы обозначают обычные физические свойства конденсата. Согласно формуле (2), тепловой поток q_w увеличивается бесконечно по мере того, как z стремится к нулю $z \rightarrow 0: q_w \rightarrow \infty$. Это означает, что очень высокие тепловые потери и сильная конденсация пара происходят на небольшой цилиндрической поверхности $\Delta A = \Delta z d\pi$, высотой Δz чуть ниже поршня. Эта небольшая цилиндрическая поверхность движется вверх вдоль цилиндра вслед за поршнем с той же скоростью w . Время τ ее появления на цилиндре можно оценить по $\tau = L/w$; тепловые потери через эту поверхность за один ход (один подъем поршня) равны

$$Q = q\tau\Delta A = (q\Delta z d\pi L)/w. \quad (4)$$

Как следует из (2), тепловые потери возникают из-за скрытой теплоты пара h_{vl} , связанной с бесполезной конденсацией пара, что согласуется с объяснениями Уатта. Также формула (4) прекрасно подтверждает наблюдение

Уатта об огромной конденсации пара как раз в начале подъема поршней из состояния покоя ($w = 0$). После старта скорость поршня сначала очень низкая, что вызывает, согласно (4), очень высокие тепловые потери.

Теплопередача по всей поверхности цилиндра, покрытого пленкой конденсата, может быть аналогично выражена и количественно оценена.

1.4.2. Теплопроводность в стенке цилиндра

Выражение (2) учитывает скрытое тепло h_v , выделяющееся на поверхности пленки, которое передается через пленку конденсата на поверхность цилиндра. После пересечения конденсатной пленки это тепло проникает в стенку цилиндра, и кинетика теплопередачи должна учитывать также тепловое сопротивление стенки цилиндра. Для оценки тепловых потерь за счет теплопроводности в стенке цилиндра воспользуемся простой моделью, проиллюстрированной вставкой справа на рис. 5. В этой модели стенка цилиндра заменена достаточно толстой плоской пластиной. Первоначально пластина имеет однородную температуру T_{w0} ; когда пар входит в цилиндр и соприкасается с поверхностью цилиндра, предполагается, что температура этой поверхности скачкообразно возрастает от T_{w0} до $T_s > T_{w0}$. Этот скачок температуры индуцирует температурное поле ($T_w(x, t)$ — кривые), которое проникает через стенку цилиндра и приводит к тепловому потоку в стенке. Принимая скачок температуры $T_s - T_{w0}$ постоянным во времени и пренебрегая сопротивлением теплопередачи в паре (высокая теплоемкость пара), тепловой поток на поверхности стенки можно получить из

$$q_{w0} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} : \left(\frac{k\rho c}{t} \right)^{1/2} (T_s - T_{w0}), \quad (5)$$

где k , ρ , c — физические свойства стенки (теплопроводность, плотность, теплоемкость соответственно), а t — время.

Сомножитель в (5) представляет собой обратную величину теплового сопротивления стенки цилиндра, $R_w = (t/(k\rho c))^{1/2}$, т. е. за очень короткое время t : $R_w \rightarrow 0$, $t \rightarrow 0$. Следовательно, тепловое сопротивление стенки на короткое время не имеет значения и (2) только описывает кинетику конденсации пара в цилиндре. Содержание этого уравнения качественно согласуется с наблюдениями Уатта над паровой машиной Ньюкомена. Как было замечено выше, Уатт наблюдал очень высокий расход пара, когда поршень только начинал подниматься от дна цилиндра. Это эквивалентно небольшому значению z в формуле (2), очень большому $\Delta T_{sw} = T_s - T_w$ в формуле (3) и малому значению времени t в формуле (5). Уатт не выразил своих наблюдений аналитически, потому что в то время (1765) не существовало соответствующих теоретических основ теплопередачи, но они были разработаны значительно позже Ж. Фурье в 1822 г. (теплопроводность) и В. Нуссельтом в 1916 г. (конденсация пара).

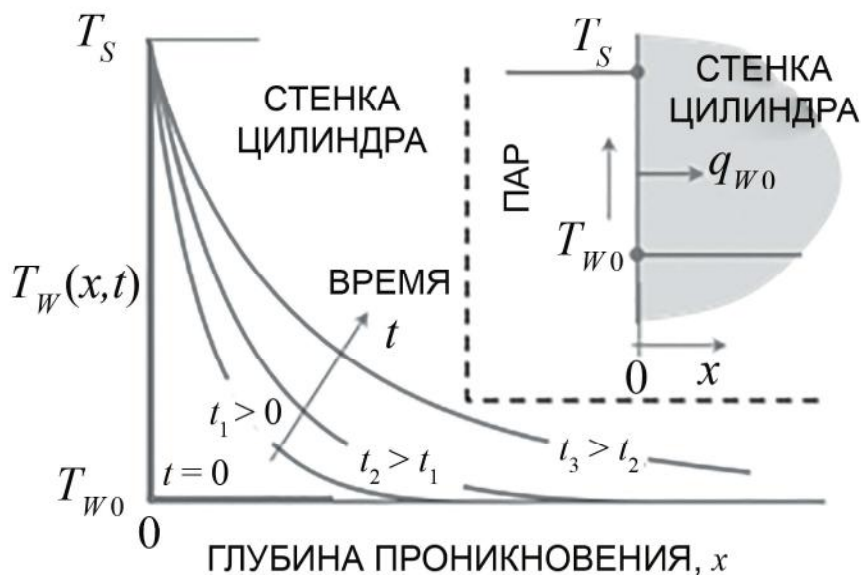


Рис. 5. Упрощенная схема тепловых потоков в стенке цилиндра

В любом случае из этого сравнения мы можем заключить, что Уатт обладал глубоким физическим пониманием тепловых процессов, происходящих в паровой машине. Он установил также качественно существование влияния физических свойств материала цилиндра на тепловые потери. Чтобы понять истинные причины тепловых потерь, он провел несколько экспериментов с различными компонентами модели паровой машины Ньюкомена, которую он сам разработал и построил; им были испытаны как поверхностные, так и струйные инжекционные конденсаторы. Все физические свойства рабочего тела (воды), которые были необходимы для его исследований и оценки различных эффектов, Уатт определил сам экспериментально, заложив тем самым основы экспериментальной термодинамики. Эти исследования привели Уатта к заключению, что в эффективно работающем паровом двигателе все тепловые потери, включая также трение движущихся компонентов (например поршня), должны быть предотвращены.

Таким образом, Уатт предвосхитил идеальный изоэнтропийный паровой двигатель. Несмотря на эти факты, не Уатт, а Карно считается создателем такой модели двигателя. Почему должны быть предотвращены тепловые потери парового двигателя? Какова была мотивация Уатта для этого требования? Эти вопросы важны, и мы дадим на них ответы ниже. Что касается влияния скрытого тепла на тепловые потери цилиндра, то вывод Д. С. Л. Кардуэлла о том, что

тепловые потери в двигателе Ньюкомена очевидны в цилиндре из тяжелого металла и через него: скрытая теплота испарения совершенно не имеет

значения, поскольку потери были бы точно такими же, если бы скрытая теплота была равна нулю ¹⁹,

может рассматриваться и как правильный, и как неправильный. Это правильно, когда учитывается только теплопередача в стенке цилиндра и не учитывается источник этого тепла. Однако пар — это вещество, которое теряет тепло при конденсации, передавая его стенке цилиндра. Поскольку пар конденсируется на поверхности цилиндра, тепло, поступающее в его стенку, возникает главным образом за счет скрытого тепла и в меньшей степени за счет переохлаждения (ощутимого тепла) конденсата (рис. 4). Как показывают формулы (2) и (3), тепловой поток стенки, выражающий тепловые потери, решительно зависит от скрытого тепла. Принимая скрытое тепло равным нулю, как утверждал Кардуэлл, тепловые потери в соответствии с формулой (2) также будут равны нулю. В этом заключается объяснение того, почему заявление Кардуэлла является неверным. Модель на рис. 5 почти соответствует его утверждению. Однако и в этом случае нельзя забывать об источнике того тепла, которое выделяется при конденсации пара. Следовательно, вывод Кардуэлла в целом несостоятелен.

2. Некоторые теплофизические свойства воды и процессы в паровом двигателе

Далее мы обсудим некоторые физические свойства воды, открытые Уаттом в ходе его исследований процессов, протекающих в тепловом двигателе. К ним относятся скрытая теплота, давление пара, объем пара, высокотемпературное расщепление пара и др. Заинтересованному читателю рекомендуется обратиться к книгам, посвященным жизни и деятельности Уатта ²⁰.

Для исследовательских целей Уатт построил модель паровой машины, сконструировав водяной котел, который позволял измерять испаряемую воду и, следовательно, количество пара, подаваемого в паровой цилиндр. Так как этот пар конденсируется в цилиндре на следующем этапе, для этого требовалось определенное количество холодной воды. Этот шаг делал актуальным изучение других физических свойств воды, таких как скрытая теплота пара, которая была неизвестна Уатту в то время, что требовало их определения в дальнейших экспериментах.

2.1. Скрытая теплота пара и термодинамическое критическое состояние

2.1.1. Скрытая теплота пара

Джозеф Блэк (1728—1799) был, по-видимому, первым человеком, который заметил, что тепловая энергия расходуется или приобретает

¹⁹ Cardwell, D. S. L. From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1971. P. 51.

²⁰ Holland, R. S. Historic Inventions. Chapter IV. Watt and Steam Engine // <http://gutenberg.readingroo.ms/4/2/5/1/42517/42517-h/42517-h.htm#IV>; Carnegie, A. James Watt. New York: Doubleday, Page & Company, 1905; Каменский. Джеймс Уатт...; Dickinson, H. W., Jenkins, R. James Watt and the Steam Engine. Oxford: Clarendon Press, 1927.

при изменении фазы вещества без изменения его температуры. Например, превращение воды в пар потребляет энергию, получаемую при конденсации пара. Поскольку температура материнской фазы остается неизменной, теплота, получаемая в процессе испарения, остается скрытой. Блэк назвал это скрытым теплом. Уатт тоже, независимо от Блэка, осознал существование скрытой теплоты и определил эту величину с помощью конденсации пара. Стюарт приводит слова Уатта о том, что последнего удивило то обстоятельство, что для охлаждения цилиндра необходимо впрыскивание большого количества воды, которая сильно нагревается от небольшого количества пара, и Блэк объяснил ему

свое учение о скрытой теплоте, которому он учил в течение некоторого времени до этого периода (лето 1764 года); но так как я (Уатт. – Й. М., А. С.) сам был занят делом, то если и слышал о нем, то не обратил на него внимания, когда наткнулся таким образом на один из материальных фактов, на которых основана эта прекрасная теория ²¹.

Для измерения скрытой теплоты пара Уатт поначалу применял паровой цилиндр в своей модели двигателя. Однако он счел этот способ нецелесообразным из-за возможных ошибок в пропорциях модели (обсуждавшихся выше) и, вероятно, из-за неконтролируемых тепловых потерь. Вместо этого он потом стал использовать прямой метод, нагревая переохлажденную воду известного количества (массы) и температуры конденсацией насыщенного пара. Он вводил в воду поток насыщенного пара, который конденсировался, и получившийся конденсат смешивался с водой. При этом процессе увеличивались как масса, так и температура жидкой фазы (воды), которую измерял Уатт. Используя эти данные, он рассчитывал скрытую теплоту по массе и тепловому балансу. Относительно этого простого и остроумного эксперимента можно прочесть следующее:

Таким образом, пар смешивался и конденсировался в той воде, которая получала всю теплоту пара, пока не нагревалась до кипения и не могла больше конденсироваться; затем было обнаружено, что вода в сосуде набрала около одной шестой части своего веса путем добавления конденсированного пара; откуда оказалось, что один фунт воды в состоянии пара может нагреть шесть фунтов воды от 52 град. до 212 град. ²²

Мы будем использовать эти данные для расчета скрытой теплоты пара. Поскольку ничего не известно (по крайней мере нам) о внешнем состоянии окружающего воздуха (температура, скорость, тепловое излучение), окружающего экспериментальную «установку» Уатта, представляется разумным предположить изобарные условия эксперимента и пренебречь тепловыми потерями в эксперименте, а энергетический баланс записать следующим образом:

²¹ *Stuart. A Descriptive History of the Steam Engine...* P. 101.

²² *Farey, J. A Treatise on the Steam Engine, Historical, Practical, and Descriptive. London: Printed for Longman, Rees, Orme, Brown, and Green, 1827. P. 312.*

$$m_S h_{vl} = m_W c_{pW} \Delta T_W, \quad (6)$$

где m обозначает массу воды (индекс W) и пара (индекс S), конденсирующегося в воде, $c_{pW} = 4200,0$ Дж/(кгК) — это средняя удельная теплоемкость жидкой воды (рекомендованная *NIST* — Национальным институтом стандартов и технологий) в диапазоне температур (от 52 °F до 212 °F), охватываемом экспериментами Уатта, и h_{vl} — скрытая теплота конденсации пара. Из эксперимента Уатта

$$m_W/m_S = 6, \Delta T_W = (212-52)^\circ F = 160^\circ F = 88,89^\circ C,$$

и формула (6) дает

$$h_{vl} = \frac{m_W}{m_S} C_{pW} \Delta T_W = 6 \cdot 4200,0 \cdot 88,89 = 2240,0 \text{ кДж/кг}.$$

Это значение на 0,77 % меньше фактического стандарта высокой точности (*NIST*) — значения, принятого в настоящее время ($h_{vl} = 2257,4$ кДж/кг). Отклонение, скорее всего, вызвано тепловыми потерями в окружающую среду и нагревом котла с водой в экспериментах Уатта, которые не были учтены в нашем расчете. Это замечательное совпадение подчеркивает глубину исследовательских способностей Уатта и строгость его анализа.

Уатт наблюдал большое потребление тепла в экспериментах на своей модели двигателя Ньюкомена, но не понимал его происхождения. Блэк дал объяснение, связывающее большой расход тепла со скрытой теплотой пара. Как можно заключить из более поздних экспериментов коллег Уатта, он не был удовлетворен своими знаниями о скрытой теплоте. Во всяком случае он был склонен считать, что общая теплота пара постоянна, это утверждение иногда называют законом скрытой теплоты Уатта ²³.

Строго говоря, точность закона Уатта ограничена. Однако, если рассматривать диапазон температур насыщения от 100 до 120 °C, являющийся приблизительно температурным диапазоном экспериментов Уатта, то отклонение полной теплоты пара составляет менее 2 %; это оправдывает применимость закона Уатта на практике. Уатт воспользовался методом Блэка и выразил скрытую теплоту испарения как повышение температуры жидкой воды в градусах по Фаренгейту, вызванное поглощением этой теплоты без испарения воды. Он получил скрытую теплоту 950 °F при температуре насыщения 212 °F и 1000 °F при насыщении 70 °F. Мы видим большую скрытую теплоту при более низкой температуре насыщения. Это открытие имеет важное значение для термодинамической критической точки, обсуждаемой далее ниже. Джон Саутерн, один из помощников Уатта, провел в 1803 г. несколько экспериментов со скрытой теплотой и послал результаты Уатту в 1814 г., предложив физическое объяснение закона. Поскольку исследование Саутерна было связано с процессами в паровом двигателе, он упомянул

²³ Cardwell. From Watt to Clausius... P. 161; Miller, D. Ph. True Myths: James Watt's Kettle, His Condenser and His Chemistry // History of Science. 2004. Vol. 42. No. 3. P. 333–360.

о возможности охлаждения пара в процессе расширения, который может инициировать конденсацию пара. Таким образом, пар переходит из однофазного состояния в двухфазное, а выделяющееся таким образом скрытое тепло противодействует дальнейшему понижению температуры, что находится в соответствии с принципом наименьшего ограничения Ле Шателье – Брауна (1884–1888): «Если системе, находящейся в равновесии, навязывают какое-либо изменение, система будет стремиться приспособиться к новому равновесию, противодействующему этому изменению». Изменение в нашем случае – это расширение пара, сопровождаемое охлаждением пара; это провоцирует частичную конденсацию пара, а высвобожденное скрытое тепло замедляет дальнейшее охлаждение пара.

2.1.2. Термодинамическое критическое состояние и состав воды

Согласно закону Уатта, общая теплота пара состоит из теплоты, необходимой для нагрева жидкости (воды) от точки замерзания (0°C) до температуры насыщения при данном давлении, и скрытой теплоты, необходимой для испарения воды при этой температуре насыщения. Как установил Уатт, эти части претерпевают взаимные изменения при изменении давления, увеличение давления уменьшает скрытую часть. Уатт изложил это взаимодействие в письме, которое он послал Ж.-А. де Люку 13 декабря 1782 г.:

Доктор Пристли сделал весьма удивительное открытие, которое, по-видимому, подтверждает мою теорию о том, что вода претерпевает некоторые весьма значительные изменения в точке, *где вся ее скрытая теплота будет преобразована в значительную теплоту* (курсив наш. – Й. М., А. С.), которая должна следовать из уменьшения скрытой теплоты, поскольку чувственная теплота увеличивается, вероятно, при температуре около 1200° по Фаренгейту ²⁴.

Содержание письма Уатта к де Люку известно из письма Дж. Пристли, отправленном Уатту 8 декабря 1782 г.

Я (доктор Пристли) (здесь и ниже имена в скобках вставлены нами. – Й. М., А. С.) имею удовольствие сообщить вам (Уатту), что я легко превращаю воду в неизменяющуюся воздушную среду, сначала соединяя ее с негашеной известью, а затем подвергая ее красному жару. Я (Пристли) считаю, что это согласуется с вашей (Уатта) идеей по этому вопросу ²⁵.

Из первой цитаты из письма Уатта к де Люку мы узнаем, что Уатт говорит о существовании определенной температуры, при которой скрытое тепло исчезает. Во второй цитате из письма Пристли к Уатту Пристли говорит о очень высокой температуре («красный жар»), при которой вода (пар) превращается в неизменяющийся далее воздух. Пристли, таким образом, экспериментально подтверждает идею Уатта о превращении воды в постоянные

²⁴ Mr. Watt to Mr. de Luc, Birmingham, 13th Dec. 1782 // Correspondence of the Late James Watt on His Discovery of the Theory of the Composition of Water / J. P. Muirhead (ed.). London: John Murray; Edinburgh: William Blackwood and Sons, 1846. P. 4.

²⁵ Dr. Priestley to Mr. Watt, Fairhill, Birmingham, 8th Dec. 1782 // Ibid. P. 3.

газы. Характерная точка Уатта, при которой скрытое тепло исчезает, позже стала известна как *термодинамическая критическая точка*. С приближением к этой точке двухфазная система (жидкость — пар) непрерывно переходит в однофазную. Это, по-видимому, редкий случай, когда существование столь важного положения было заявлено так ясно в литературе. Однако авторство Уатта осталось неизвестным, и его имя не упоминается в этом контексте.

На рис. 6 показано положение точки Уатта на диаграмме T, p . Эта точка имеет самые высокие значения температуры T и давления p на кривой давления пара Уатта (см. ниже), которая представляет равновесные состояния системы пар — жидкость. T, p -координаты точки Уатта, обычно обозначаемые как критические значения, для воды имеют приблизительные значения $T_{CR} \approx 647,0\text{ K}$, $p_{CR} \approx 22,0\text{ МПа}$. Вдоль кривой Уатта двухфазные системы существуют в равновесии, в то время как выше критической области при $T > T_{CR}$ и $p > p_{CR}$ система находится в однофазном состоянии. В этой области система демонстрирует замечательные изменения физических свойств (фазовые переходы второго и более высокого порядка), что уже было замечено Уаттом в 1782 г.

В письме Блэку от 13 декабря 1782 г. Уатт пытается получить определенную информацию о его, Блэка, работах, которую он планировал передать де Люку для публикаций о теплоте²⁶. В том случае, если Блэк не сможет предоставить никакой информации, Уатт хотел бы более полно объяснить де Люку учение Блэка о скрытой теплоте пара, но он не знал, как избежать смешения того, что, возможно, было внушением его собственного ума, с тем, что он узнал от Блэка. Уатт хотел бы избежать этого смешения, потому что его, Уатта, предположения могут не сделать чести теории Блэка. В заключение Уатт предложил передать де Люку следующую информацию:

То, что я хочу сказать ему, что я думаю, что мое собственное, это:

- эксперимент по скрытой теплоте в вакууме и обнаружению, что она больше, чем под давлением атмосферы;
- эксперименты по установлению различных степеней теплоты, при которых вода кипит под различными давлениями;
- расширение, которое пар в своем совершенном состоянии получает от тепла;
- и эксперименты с объемом воды, когда она превращается в пар; вместе с теорией, которую я разработал, которая объясняет кипящую теплоту воды, не следуя геометрической прогрессии; и показывая, что по мере того, как пар расходится со своим скрытым теплом, по мере того, как он приобретает значительное тепло или более сжимается, что когда он достигает определенной точки, он не будет иметь скрытого тепла и может при надлежащем сжатии быть упругой жидкостью, почти такой же специфически тяжелой, как вода; в этот момент я предполагаю, что он снова изменит свое состояние и станет чем-то иным, чем пар или вода. Мое мнение состояло в том, что тогда он превратится в воздух; к такому выводу меня привели многие обстоятельства, и

²⁶ Mr. Watt to Dr. Black, Birmingham, 13th Dec. 1782 // Ibid. P. 5–8.

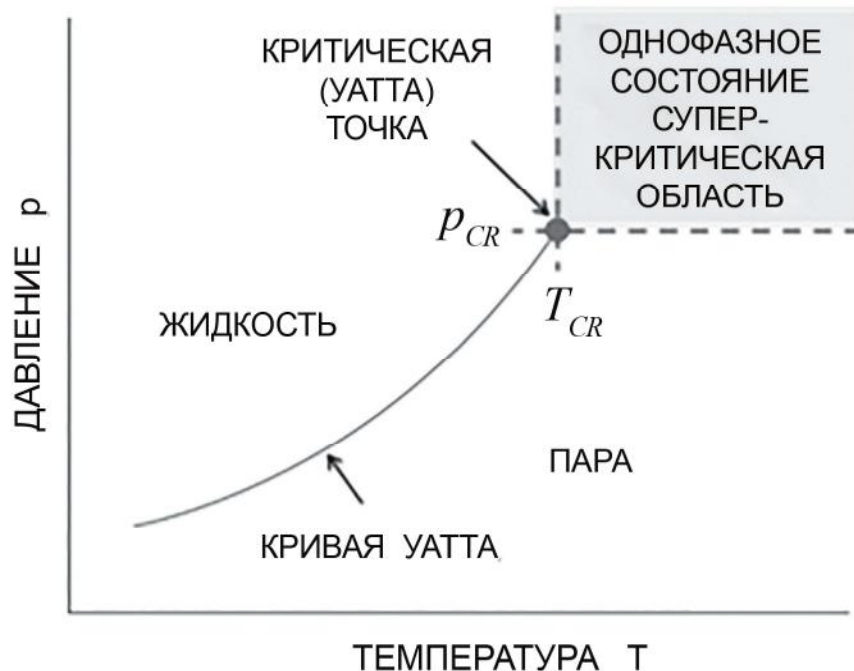


Рис. 6. Положение термодинамической критической точки (точки Уатта) чистого жидкого вещества на T, p – диаграмме. Положение этой точки определяется наибольшими T, p – значениями кривой Уатта. Начиная с низких значений p и T , скрытая теплота уменьшается вдоль кривой, исчезая в критической точке

это подтверждается экспериментом, проведенным на днях доктором Пристли в его обычной манере исследования ²⁷.

Научные работы, о которых упоминает Уатт, целиком относятся к области термодинамики двухфазных систем и охватывают процессы с изменением фаз, в частности процессы кипения и конденсации. Если мы добавим цикл Уатта с преобразованием тепловой энергии в механическую, это составит почти полную термодинамику первой половины XIX в. Здесь мы могли бы снова привести слова Ренкина о том, что мало кто внес больший вклад в развитие термодинамики, чем Уатт. Насколько велик и важен его вклад в области термодинамики, настолько непостижима ответственность следующих поколений ученых в этой области за то, чтобы эти достижения не были прочно включены в историю термодинамики.

Идеи Уатта 1780-х гг. об уменьшении и исчезновении скрытой теплоты и появлении термодинамической критической точки можно рассматривать как научный курьез. Позднее, более чем через восемь десятилетий после работы Уатта, была опубликована первая статья в этой области с важными деталями. В 1869 г. ирландский физик Томас Эндрюс сообщил о результатах

²⁷ Ibid. P. 6.

детальных исследований непрерывности жидких состояний²⁸. Два года спустя, в 1871 г., Джеймс Томсон, старший брат Уильяма Томсона (лорда Кельвина), опубликовал дополнительные сведения об условиях непрерывности в области ниже критического давления²⁹. Эти работы дали значительные импульсы для дальнейшего развития термодинамики, в частности, Томсон ввел идею неустойчивых состояний (перегретая жидкость, переохлажденный пар) в физику жидких систем, связанных с фазовым переходом. Однако ни Эндрюс, ни Томсон не упоминали Уатта в своих работах.

Конечным звеном в цепочке мыслей Уатта о фазовом переходе является связь росы (водяного конденсата), образующейся на стенках реакционного сосуда после сгорания компонентов воздуха (водорода и кислорода), с составом воды (см. вышеупомянутые письма Уатта к де Люку и Блэку от 13 декабря 1782 г.). Пристли, по-видимому, был первым, кто наблюдал образование конденсата в химической реакции, не давая никакого объяснения этому любопытному явлению, но он написал 8 декабря 1782 г. Уатту о своем открытии (см. выше). Опыт Уатта с конденсацией в паровых двигателях привел его к заключению, что вода (роса), наблюдаемая на стенке реакционного сосуда, может возникнуть только из конденсации пара, образующегося при сгорании газообразного водорода. Он сформулировал этот вывод как вопрос самому себе:

Не вправе ли мы тогда заключить, что вода состоит из дефлогистированного воздуха (кислорода. – Й. М., А. С.) и флогистона (водорода. – Й. М., А. С.), лишенных части своего скрытого или элементарного тепла?³⁰

Это, по-видимому, первое исключительно ясное утверждение в литературе о том, что вода — не природный элемент, как считалось с древнейших времен, а сложное соединение. Из его размышлений также следует вывод, что горение может происходить только при определенном составе газовой смеси. Как он указывает, его материал 1784 г.³¹ основан на письме, отправленном Пристли 26 апреля 1783 г. и переданном последним в Лондонское королевское общество, но не опубликованном тогда же³². В нем Уатт описывает реакцию горения водорода с кислородом, дающую воду, свет и тепло в качестве продуктов реакции. Сообщалось, что теплота реакции значительно превышает скрытую теплоту пара.

Учитывая огромное научное значение этой идеи, вполне понятно, что некоторые ученые пытались претендовать на исключительно свое авторство. Это положило начало хорошо известному спору о воде, в котором

²⁸ *Andrews, Th.* The Bakerian Lecture: On the Continuity of the Gaseous and Liquid States of Matter // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1869. Vol. 159. P. 575–590.

²⁹ *Thomson, J.* Continuity of the Fluid and Gaseous States of Matter // *Nature*. 1871. Vol. 5. No. 110. P. 106–108.

³⁰ *Watt, J.* Thoughts on the Constituent Parts of Water and of Dephlogisticated Air; With an Account of Some Experiments on That Subject; Letter from Mr. James Watt to Mr. De Luc, F. R. S. // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1784. Vol. 74. P. 333.

³¹ *Ibid.* P. 329–353.

³² *Ibid.* P. 329–330.

участвовали Уатт, Генри Кавендиш и Антуан Лоран Лавуазье. Чарльз Благден (*Charles Blagden*, 1748–1820), тогдашний секретарь Королевского общества и близкий друг Кавендиша, как говорят, задержал публикацию письма Уатта без видимой причины. Случайность это или умышленное действие? Вопросительный знак все еще остается. Однако в письме Благдена, отправленном Уатту 25 мая 1784 г., говорится:

...поэтому я прошу вас сообщить мне, следует ли ваше первое письмо доктору Пристли, датированное 26 апреля 1783 г., опубликовать целиком или включить во второе, или исправленное, письмо, датированное 26 ноября 1783 г. Единственная причина для того, чтобы предложить этот последний вариант, состоит в том, что идеи более полно разработаны в этом втором письме; и чтобы избежать повторений...³³

Даты двух писем, упомянутых Благданом, являются правильными. В письме от 27 мая 1784 г. Уатт дал четкие инструкции о том, как обращаться с этими письмами³⁴, которые Благден строго не реализовал в опубликованной версии. Наиболее важной в этом контексте являются неправильные датировки Благдена, указанные в публикации Уатта³⁵: письмо Уатта де Люку датировано там 26 ноября 1784 г., а подзаголовок перед письмом гласит, что оно было прочитано в Лондонском королевском обществе 29 апреля 1784 г. Поскольку дата прочтения не может быть раньше даты написания письма, то более поздняя дата однозначно неверна. Эти даты очень важны в контексте вопроса о приоритете; принятие более поздней показывало бы, что не Уатт, а Кавендиш был первым, кто обнаружил состав воды. Благден мог бы исправить это недоразумение, опубликовав поправку, но этого не сделал.

Честь открытия состава воды принадлежит, по нашему мнению, только Уатту. Этот вывод основан на анализе предмета письма, в пользу этого говорит также содержание письма Уатта, отправленного Фраю (15 мая 1784 г.), в котором он пишет, что

имел честь, подобно другим великим людям, подвергнуться пиратству в отношении своих идей. Вскоре после того как я написал свою первую работу на эту тему, д-р Благден объяснил мою теорию господину Лавуазье в Париже, а вскоре после этого господин Лавуазье сам пришел к тому же и прочитал доклад на эту тему в Королевской академии наук. После этого мистер Кавендиш сделал в Королевском обществе сообщение, посвященное тем же идеям, но ни словом не обмолвился обо мне³⁶.

Ход этой полемики хорошо задокументирован в литературе; таким образом, в этом контексте можно привести лишь несколько публикаций в дополнение

³³ Dr. Blagden to Mr. Watt, London, May 25, 1784 // *Correspondence of the Late James Watt...* P. 62.

³⁴ Mr. Watt to Dr. Blagden, Birmingham, 27th May, 1784 // *Ibid.* P. 63.

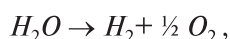
³⁵ *Watt. Thoughts on the Constituent Parts of Water...* P. 329.

³⁶ Mr. Watt to Mr. Fry of Bristol, Birmingham, 15th May, 1784 // *Correspondence of the Late James Watt...* P. 61.

к работам Дж. П. Мюрхеда³⁷. Изначально идея Уатта состояла не в том, чтобы показать, что в результате химической реакции определенных газов (водорода и кислорода) образуется вода, а, наоборот, в том, что вода может быть расщеплена на составляющие ее части. Это, в сущности, одно и то же; тогда результаты обоих процессов приводят к одному и тому же заключению, а именно, что вода является соединением. В этой связи мы приводим письмо Уатта Болтону от 10 декабря 1782 г.:

Возможно, вы помните, что я часто говорил, что если бы воду можно было нагреть докрасна или еще как-то, то она, вероятно, превратилась бы в какой-то вид воздуха, потому что пар в этом случае потерял бы всю свою скрытую теплоту и что он превратился бы исключительно в тепло, и, вероятно, последовало бы полное изменение природы жидкости³⁸.

В то время как Уатт четко определяет термодинамическую критическую точку пара как состояние, в котором скрытая теплота исчезает, его представление о состоянии термического разложения воды менее точно. Это понятно, если учесть, что это состояние определяется равновесным состоянием эндотермической химической реакции



которая не является произвольной при более низких температурах системы. С повышением температуры системы реакция меняет свой характер, становясь при определенной температуре (выше 2500 °С) самопроизвольной. Минимальная температура, при которой происходит переход от непроизвольного к самопроизвольному, может рассматриваться как минимальная температура для термического разложения воды. Ясно, что во времена Уатта (начало 1780-х гг.) подобные соображения были невозможны. В этом контексте термодинамика Уатта имеет значение исключительно как идея, которую он породил, так и его представление о том, что вода — это не элемент, а соединение.

2.2. Давление пара в работающем двигателе

Намереваясь популяризировать труды Лондонского королевского общества, французский физик Д. Папен в 1679 г. изобрел сосуд, сегодня известный как скороварка, — кастрюлю с герметично закрывающейся крышкой для приготовления пищи при повышенной температуре, и заметил повышение

³⁷ См.: *Wilson, G.* The Life of the Hon^{ble} Henry Cavendish, Including Abstracts of His More Important Scientific Papers, and a Critical Inquiry into the Claims of All the Alleged Discoverers of the Composition of Water. London: Printed for the Cavendish Society, 1851; *Edelstein, S. M.* Priestley Settles the Water Controversy // *Chymia*. 1948. Vol. 1. P. 123–137; *Miller, D. Ph.* ‘Distributing Discovery’ between Watt and Cavendish: A Reassessment of the Nineteenth-Century ‘Water Controversy’ // *Annals of Science*. 2002. Vol. 59. No. 2. P. 149–178; *Miller, D. Ph.* Discovering Water: James Watt, Henry Cavendish and the Nineteenth-Century “Water Controversy”. Aldershot; Burlington: Ashgate, 2004.

³⁸ *Carnegie.* James Watt... P. 172.

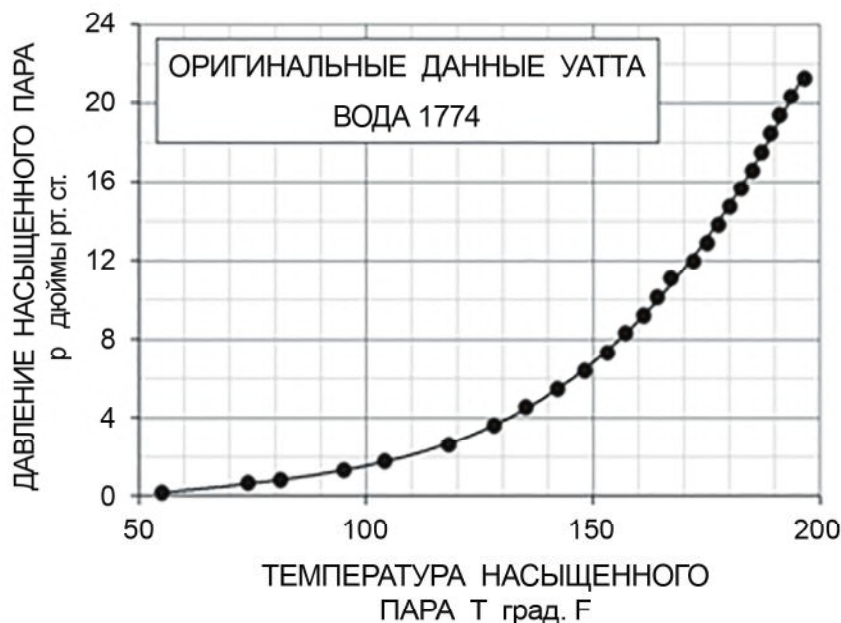


Рис. 7. Результаты экспериментов Уатта (1774): давление насыщенного пара (дюймы ртутного столба) в зависимости от температуры (градус F). Сплошная линия – кривая тренда

давления пара при повышении температуры кипения воды³⁹. Это заключение стало важным в связи с безопасными конструкциями паровых двигателей, но Папен не предоставил никаких данных, которые могли бы количественно определить зависимость давления пара от температуры насыщения. Уатт был первым человеком, который установил такую зависимость в своем стремлении улучшить паровую машину, и первым естествоиспытателем, который сделал какие-либо точные эксперименты по упругости пара⁴⁰. Начиная с зимы 1764–1765 гг. он проводил последовательные измерения температуры и давления пара кипящей воды. Используя эти данные, Уатт построил диаграмму, в которой измеренная температура была отложена вдоль оси абсцисс, а давление – ординат. Его интересовало давление пара прежде всего в практических целях. Он пытался понять причины недостатков паровой машины Ньюкомена; для этого требовались данные о давлении пара ниже атмосферного.

Полученные в 1764 г. данные во многом удовлетворили технические требования Уатта, но не его научный интерес. Примерно через десять лет, в 1773–1774 гг., он снова взялся за эту проблему и провел дальнейшие, более

³⁹ Papin, D. A New Digester for Softening Bones [...]. London: Printed by J. M. for Henry Bonwicke, 1681.

⁴⁰ Steam // The Edinburgh Encyclopaedia / D. Brewster (ed.). Philadelphia: Joseph Parker, 1832. Vol. 17. P. 390.

точные измерения как самостоятельно, так и с помощью своих коллег, охватывая диапазон давления до 80 дюймов ртутного столба. Он использовал различные чистые вещества и некоторые водные растворы солей. На рис. 8 показана диаграмма Уатта, построенная на основе его исходных данных, полученных с помощью воды в 1774 г. Он заметил, что арифметическая прогрессия температуры соответствует геометрической прогрессии давления пара, т. е. $dp \sim (dT)^n$, $n > 1$. Зависимость $p = p(T)$ стала известна как *кривая давления пара*, но Уатт не упоминается как ее создатель. Вместо этого его вклад ставится под сомнение в этом контексте, как показано ниже.

Как нам кажется, Уатт не опубликовал бы своих результатов, если бы Дэвид Брюстер (1781–1868) не попросил его сделать обзор работ по паровому двигателю, написанных ранее Джоном Робисоном, для планируемого нового издания «Британской энциклопедии». Название этой публикации следующее: «Статьи “Пар и паровые машины”, написанные для “Британской энциклопедии” Джоном Робисоном и составляющие часть трудов доктора Робисона, изданных Дэвидом Брюстером, с примечаниями и дополнениями Джеймса Уатта и письмом о некоторых свойствах пара, написанным покойным Джоном Саутерном. Эдинбург, 1818 год». Причина, по которой Уатт не опубликовал свои результаты раньше, скажем, в 1760-х или 1770-х гг., понятна с точки зрения его участия в разработке паровых двигателей.

Почему кривая давления пара Уатта должна принадлежать термодинамике? Ответ на этот вопрос содержится практически в любом трактате по этой науке. Для читателя, не знакомого с термодинамикой, достаточно упомянуть, что давление является одним из параметров состояния термодинамической системы. В однокомпонентных двухфазных системах кривая $p = p(T)$ делит жидкую фазу на жидкость и пар. Вдоль кривой две фазы находятся в термодинамическом равновесии друг с другом см. рис. 6. Кривая полезна в теории нуклеации, теории фазовой устойчивости, а также для исследования метастабильных состояний, нуклеации и роста новой фазы, теплообмена, сопровождающегося сменой фаз, в естественных (атмосферных) и технических процессах. Своими исследованиями давления пара Уатт открыл новую область термодинамики и внес вклад в разработку основ как теоретической, так и экспериментальной термодинамики. Теоретические основы этой кривой были заложены Клапейроном и Клаузиусом спустя почти 70 лет после экспериментов Уатта.

Несмотря на эти достижения, Уатт, как уже говорилось, почти не упоминается в истории термодинамики. Даже его эксперименты с давлением пара не полностью признаны. Первые измерения давления пара обычно приписывают семье Кавендишей (отец Чарльз (1704–1783) и его сын Генри (1731–1810)). В качестве доказательства того, что Чарльз Кавендиш проводил эксперименты с давлением пара, приводятся показания его сына Генри, сделанные по памяти. Последний утверждал, что эти работы его отца относятся 1757 г., опубликованы они были только в 1921 г., примерно 160 лет спустя ⁴¹.

⁴¹ The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish / E. Thorpe (ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 1921. Vol. 2: Chemical and Dynamical Works.

2.3. Потеря разности давлений в паровых двигателях

В первом разделе мы рассмотрели тепловые потери паровой машины в соответствии с анализом Уатта. Он очень серьезно рассматривал также потери от перепада давления в двигателе. Анализ Уатта этих потерь, таким образом, является нашей следующей задачей. Мы последуем примеру Уатта и ограничимся рассмотрением атмосферного парового двигателя. Воспользуемся описанием, выполненным самим Уаттом, и построим p, v — диаграмму. Исторически наши соображения относятся к первому семейству паровых двигателей, предшествующему отделению конденсатора от парового цилиндра, которое в основном представляет паровой двигатель Ньюкомена (атмосферный). Анализ Уатта был направлен на дальнейшее понимание рабочих деталей этого двигателя.

Движущей силой, действующей на поршень, является разность давлений — внешнего (атмосферного) и внутреннего (цилиндрического) давления. Обозначая эти давления с помощью p_a и p_i соответственно, разность давлений Δp выразим как

$$\Delta p = p_a - p_i. \quad (7)$$

Трудность с этой величиной возникает из-за разных требований к ней на разных стадиях движения поршня. На рабочей стадии Δp должно быть как можно больше, а на следующей — как можно меньше. Быстрота изменения перепада давлений определяет мощность парового двигателя. Рис. 9 иллюстрирует функционирование атмосферного парового двигателя в координатах давление — объем (p, v) согласно описанию Уатта.

Состояние 1 представляет собой насыщенный пар в цилиндре в начале рабочего хода. Будем считать, что цилиндр не содержит никакой жидкой фазы в этом состоянии; v_{SO} обозначает удельный объем насыщенного пара при максимальном давлении $p_i \approx p_{max}$; $v_{SO} = V_{CYL}/m_{SO}$. Для большей прозрачности рассуждений предположим далее, что конденсация пара происходит не за счет нагнетания охлаждающей воды в паровое пространство, а за счет поверхностного охлаждения цилиндра. Впрыск охлаждающей воды в цилиндр не изменит физику конденсации пара. Мы предположили, что кривая является выпуклой относительно оси v , но это предположение не исключает и других форм кривой.

Конденсация происходит вдоль кривой $1 \rightarrow 2$, и вдоль этой кривой цилиндр содержит две фазы — пар и конденсат. В состоянии 2 пар полностью сжижается и в цилиндре при минимальном давлении присутствует только насыщенный конденсат. При помощи насоса конденсат подается в котел при максимальном давлении p_{max} (состояние 3). При этом давлении конденсат нагревается до состояния 4, где он затем испаряется, и образующийся пар поступает при постоянном давлении в паровой цилиндр (состояние 1). Этот шаг завершает рабочий цикл. Площадь поверхности внутри цикла на этой диаграмме пропорциональна работе, выполняемой паром.

Уменьшение удельного объема v_{SL} двухфазной системы при уменьшении давления p_i внутри цилиндра может показаться необычным. Однако это

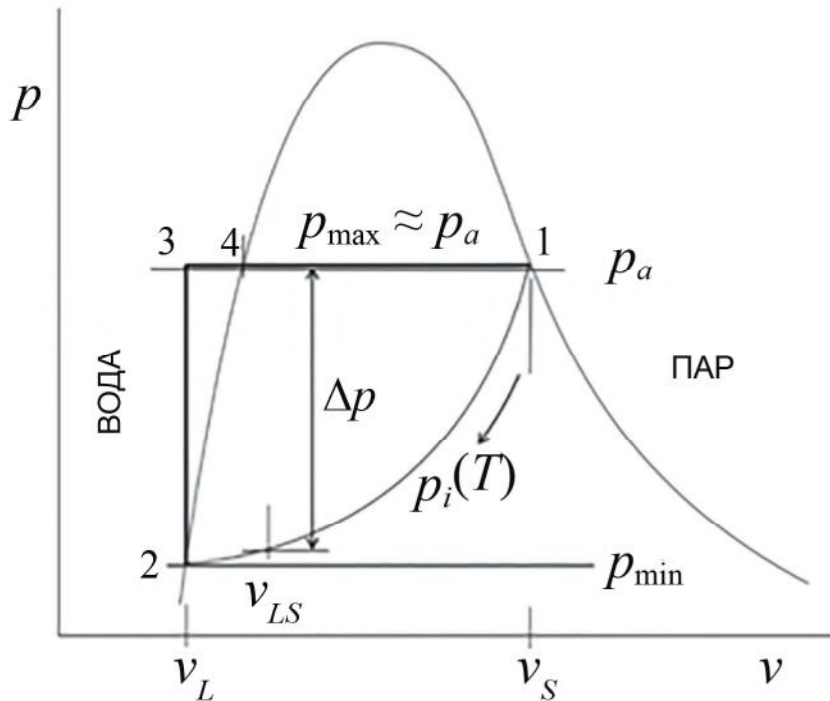


Рис. 8. Схема парового цикла атмосферного парового двигателя в соответствии с формулировкой Уатта

становится очевидным, если учесть, что объем v_{SL} , занимаемый двумя фазами, равен объему цилиндра под поршнем; и этот объем уменьшается по мере того, как поршень опускается, причем последнее вызвано конденсацией пара. Эти взаимодействия приводят к поведению, показанному на рис. 8.

Соответствующее выражение для конкретного объема имеет вид

$$v_{SL} = \frac{v_{SL}}{m_{SO}},$$

где m_{SO} обозначает массу пара до начала спуска поршня. Эта масса не изменяется в процессе конденсации, что очевидно, если мы принимаем цилиндр за герметичный паровой цилиндр.

Поскольку внешнее давление постоянно, мы можем визуализировать некоторые свойства этого цикла, рассматривая только изменения внутреннего давления p_i . Начиная с первого рабочего хода (шага), состояния 1 на рис. 9, которое означает максимум как $p_i = p_{max}$ и T , скорость изменения давления со временем может быть записана в виде

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dT} \frac{dT}{dt} < 0$$

где, по соображениям простоты, индекс i , присоединенный к p , опущен. Из-за того что $dp/dT > 0$, как показали эксперименты Уатта (рис. 7), приведенное выше неравенство требует, чтобы $dp/dT < 0$ и конденсация не происходила при постоянной температуре. Как при конденсации путем нагнетания воды в цилиндр, так и при поверхностном охлаждении (конденсации) цилиндр и большинство его конструктивных элементов охлаждались. В обоих случаях эффективное охлаждение требует низкой температуры и большого расхода охлаждающей воды⁴². Такие параметры были выгодны для рабочей ступени, которая завершается при минимуме внутреннего давления (рис. 8). Однако на следующей ступени (обратный ход поршня, восходящий) необходимо максимальное давление, и переход от минимального к максимальному должен быть осуществлен как можно быстрее. Единственной возможностью для этого было соединить цилиндр с котлом и ввести в цилиндр свежий пар при температуре насыщения; непосредственный контакт холодного цилиндра с насыщенным паром был неизбежен, что приводило к бесполезной конденсации пара (см. рис. 4).

Изменение внутреннего давления (температуры) и, в частности, высоты давления пара привело к дилемме, и вопрос, который необходимо решить, заключался в следующем: как выбрать соответствующую величину p_{min} , которая должна привести к эффективной работе двигателя? Уатт признал, что низкое давление увеличивает мощность двигателя, но снижает температуру цилиндра. Напротив, более высокое давление p_{min} приводит к более высокой температуре цилиндра, но снижает мощность двигателя. Любое дальнейшее охлаждение цилиндра требовало дополнительного нагрева и приводило к более высоким тепловым потерям. Эта дилемма превращалась в тупиковую задачу, решение которой было возможно только за счет мощности двигателя или экономии топлива. На основе таких или подобных рассуждений Уатт понял, что новая концепция преобразования энергии была неизбежна. Он не принял ранее практиковавшуюся рекомендацию о поддержании рабочего давления поршня эмпирически на уровне 6–7 фунтов на квадратный дюйм вместо теоретически возможных примерно 14 фунтов на квадратный дюйм.

На рис. 9 показана потеря разности давлений движения Δp_{loss} в виде вертикального расстояния между пунктирной линией и сплошной линией под ней. Потеря мощности (полезной энергии) двигателя пропорциональна потере разности давлений движения в соответствии с интегралом

$$\int_{v_L}^{v_S} \Delta p_{loss} dv.$$

Согласно Уатту, причины падения давления были следующие:

1. Инерция и трение поршня. Любое изменение скорости поршня приводит к возникновению силы инерции, которая может быть выражена как разность давлений, противодействующая движению поршня. Это включает

⁴² Robison. A System of Mechanical Philosophy... Vol. 2. P. 113.

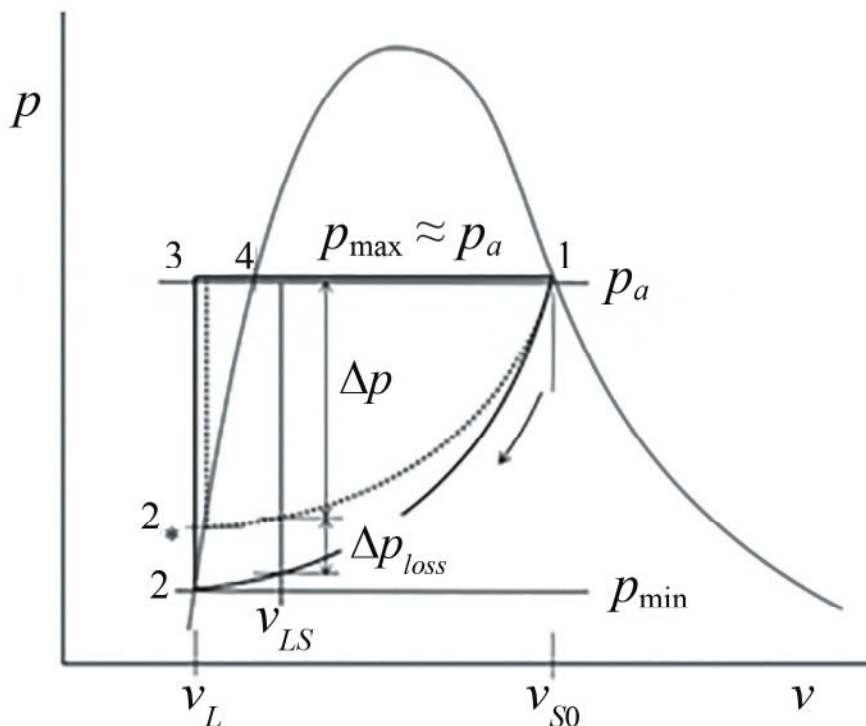


Рис. 9. Иллюстрация потери мощности двигателя, вызванной повышением минимального давления: состояние 2* вместо 2. Пунктирные линии отражают реальные состояния

также механическую передачу и пленку конденсата, прилипающую к поверхности цилиндра. Поршень толкает эту пленку, создавая таким образом напряжение сдвига на стенке цилиндра, и соответствующая сила реакции должна быть преодолена за счет полезной работы.

2. Испарение конденсата на поверхности цилиндра. Охлаждение цилиндра холодной водой приводит к двум эффектам: а) повторному нагреву цилиндра и б) установлению обратного давления. Первое означает, что вся масса цилиндра охлаждается и на следующем этапе работы двигателя нагревается конденсацией пара, и это самая бесполезная конденсация пара в цилиндре. Второе связано с тем, что охлаждение цилиндра происходит не скачкообразно, а в зависимости от теплопроводности стенки цилиндра. Тепло, поступающее от объема цилиндра к внутренней поверхности цилиндра, нагревает и испаряет водяную пленку на этой поверхности. Испарение увеличивает давление пара и создает обратное давление в цилиндре. Обратное давление визуализируется как Δp_{loss} (показано на рис. 9). Это уменьшает разность рабочих давлений, действующих на поршень, и способствует полной потере полезной работы. Уатт ясно описал все эти эффекты, а поиски технического решения привели его к идее отдельного конденсатора. Отсюда можно сделать вывод, что ряд эффектов, снижающих КПД парового

двигателя, стали руководящей идеей для Уатта при создании отдельного конденсатора. Из них определяющими были потери тепла и разность давлений при движении.

2.4. Объем насыщенного пара

Для определения свойств паровой машины требовалось уметь измерять объем насыщенного пара. Для этого Уатт использовал гравиметрический метод и получил величину объема при атмосферном давлении примерно в 1800 раз большую, чем у насыщенной воды. Он знал, что это свойство очень сильно зависит от давления. Его знание было важно для понимания силы пара в паровом двигателе при работе в расширенном режиме. Кроме того, испарение воды при низком давлении в двигателях вызывало обратное давление, действующее на поршень, тем самым способствуя потере разности давлений привода (рис. 9). Для количественной оценки обратного давления величина объема пара была необходима. Найденное Уаттом значение находится в приемлемом согласии с фактическим значением при почти атмосферном давлении. Эксперимент Уатта был также важен для исправления старых ошибочных результатов, сообщенных Дж. Т. Дезагюлье⁴³, согласно которому объем пара при нормальной температуре кипения был примерно в 14 000–18 000 раз больше объема насыщенной воды⁴⁴. Поскольку этот результат более чем в десять раз превышает правильное значение Уатта, он не только бесполезен, но и исключает любой физически обоснованный вывод при попытке улучшить тепловой двигатель. Это может быть одной из причин, по которой Уатт сам измерял значения физических величин, необходимые ему для работы.

2.5. Расширение и конденсация пара

В 1974 г. А. Дж. Пейси в своей статье назвал изобретение атмосферного парового двигателя Ньюкомена (1712), патент Джеймса Уатта на конденсатор, отдельный от цилиндра двигателя (1769), и следующий патент Уатта на использование процесса расширения пара (1782) выдающимися событиями XVIII в. в истории термодинамики⁴⁵. Это утверждение может быть принято без существенных изменений, хотя свои вклады в развитие термодинамики внесли и другие ученые, например Блэк и граф Румфорд. Первые два события, на которые обратил внимание Пейси, были подробно рассмотрены выше. Теперь обратимся к патенту Уатта 1782 г. с точки зрения основных положений термодинамики, которые в нем содержатся.

Название патента «Некоторые новые усовершенствования паровых или тепловых машин для подъема воды и других механических задач и некоторые

⁴³ Desaguliers, J. T. A Course of Experimental Philosophy. London: Printed for W. Innys, M. Senex, T. Longman, 1744. P. 320.

⁴⁴ Robison. A System of Mechanical Philosophy... Vol. 2. P. 108; Stuart. A Descriptive History of the Steam Engine... P. 24.

⁴⁵ Pacey, A. J. Some Early Heat Engine Concepts and the Conservation of Heat // The British Journal for the History of Science. 1974. Vol. 7. No. 2. P. 135–145.

новые механизмы, применимые для того же»⁴⁶. Из этого патента, который является инновационным и всеобъемлющим, мы воспроизведем только спецификацию № 1, которая особенно важна для нашего исследования:

1. Использование пара по расширительному принципу: вместе с различными методами или приспособлениями (числом шесть, некоторые из которых содержат различные модификации) для выравнивания мощности расширения⁴⁷.

Вопреки общепринятому мнению, Уатт показал, что удельная производительность паровой машины не уменьшается, если пар, поступающий в цилиндр, заполняет не весь его объем, а лишь часть его, в то время как оставшаяся часть объема цилиндра используется для расширения пара. Метод Уатта состоял в том, что в определенный момент, прежде чем паровой цилиндр целиком наполнится паром, он перекрывал его подачу и позволял пару расширяться. Частью патентной спецификации был рис. 10, иллюстрирующий идею Уатта. Он показывает распределение давления вдоль оси цилиндра, если отсечение происходит при объеме пара в цилиндре, равном 1/5 объема цилиндра. Как следует из диаграммы, произведение среднего давления и объема цилиндра меньше при расширении пара, чем без него. Однако деление этого продукта на массу пара, взятого из котла, дает большую величину с расширением пара, чем без него. Другими словами, работа пара на единицу массы потребляемого пара больше при расширении, чем без него.

Сокращение потребления пара обеспечивает сокращение потребления топлива (угля), что было главным намерением Уатта. В этом контексте следует отметить, что предполагаемое изотермическое расширение приводит к самому слабому изменению давления и максимальной работе процесса расширения. Уатт был хорошо осведомлен об этой корреляции и пытался реализовать изотермические условия на практике, насколько это было возможно. Он окружил паровой цилиндр слоем пара, имеющего ту же температуру (рис. 3). Как бы остроумно ни выглядела эта мера в отношении теплоизоляции цилиндра, было достигнуто не изотермическое, а почти адиабатическое расширение пара.

Патент Уатта 1782 г., касающийся расширения пара, является логическим продолжением его патента 1769 г., где он уже использовал расширение пара в рабочем ходе двигателя. При соединении рабочего цилиндра, наполненного паром, с отдельным холодным конденсатором происходило расширение пара, и это делало возможным опускание рабочего поршня. Что касается восприятия метода расширения пара Уатта в инженерной практике и его использования, в частности, Карно, то можно обратиться к публикации

⁴⁶ Specification of Patent, March 12th, 1782, for Certain New Improvements upon Steam or Fire Engines for Raising Water, and Other Mechanical Purposes, and Certain New Pieces of Mechanism Applicable to the Same // *Muirhead. The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt...* Vol. 3. P. 55–87.

⁴⁷ Ibid. P. 55.

Мы включили этот рисунок в нашу работу, чтобы показать, какие термодинамические идеи Уатта лежат в основе процессов, составляющих диаграмму. К этим идеям относятся отдельный паровой цилиндр, отдельный конденсатор, отсечка подачи пара, расширение пара, область, идентифицируемая

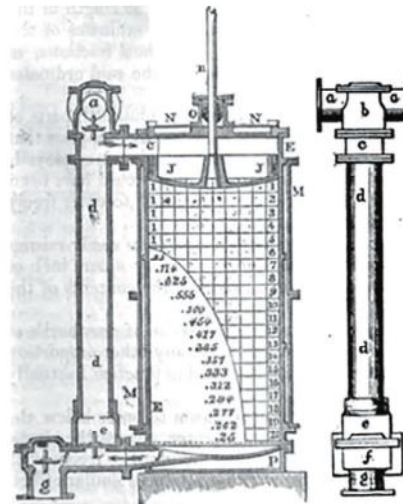


Рис. 10. Изотермическое расширение пара по расчетам Уатта в рамках его патентной спецификации 1782 г. Распределение давления по цилиндру при отключении подачи пара происходит при объеме пара в цилиндре, равном $1/5$ объема цилиндра (Farey, A Treatise on the Steam Engine... P. 347)

⁵⁰ *Clark, D. K. Expansive Working of Steam in Locomotives // Institution of Mechanical Engineers. Proceedings. Birmingham: Published by the Institution, 1852. P. 60–88, 109–131.*

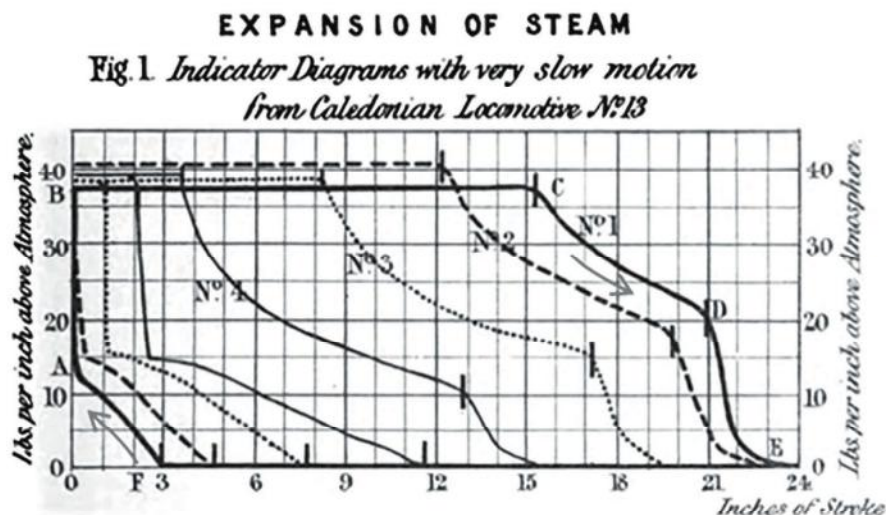


Рис. 11. Влияние отсечки пара на форму индикаторной диаграммы расширительно работающего парового двигателя. А — точка впуска пара; С — точка отсечения, или подавления; D — точка выхлопа, или выпуска; F — точка сжатия; часть хода, описываемая при прослеживании линии АВ, является периодом предварительного допуска

как работа пара, а также сама идея, концепция и создание прибора (индикатора давления), используемого для формирования подобных диаграмм.

Помимо улучшения работы двигателя за счет расширения пара мы также отметим важный вклад Уатта в основы термодинамики. Он экспериментально продемонстрировал возникновение расширительной конденсации в своей лаборатории в Сохо, Бирмингем. Поводом послужил визит к Уатту Кавендиша и Благдена в рамках их «философских путешествий» — особых визитов к известным ученым для обсуждения научных проблем. Некоторое представление об этом событии дает книга К. Юнгникель и Р. Мак-Кормача⁵¹. Более подробную информацию приводит Д. Ф. Миллер, который цитирует записную книжку Кавендиша:

Г-н Уатт упоминал о том, что, обнаружив в цилиндре паровой машины некоторое количество сконденсированного пара, окруженного паром, он провел эксперимент, чтобы выяснить, что произошло. Он направил пар в верхнюю часть стеклянного сосуда (сделав его сообщающимся с той частью цилиндра этой паровой машины, в которой есть попеременно пар и вакуум) и обнаружил, что при создании вакуума часть пара конденсируется по бокам стеклянного сосуда; и нагрев стенки этого сосуда так, что ничто не могло на них конденсироваться, он наблюдал, как происходит конденсация, так что пар стал

⁵¹ Jungnickel, C., McCormach, R. Cavendish: The Experimental Life. 2nd ed. (2016) // <http://edition-open-access.de/studies/7/>.

виден в середине стеклянного сосуда [...] облако начало появляться при каждом вакууме ⁵².

Таким образом, Уатт экспериментально доказал конденсацию расширяющегося пара в цилиндре при изменении давления. Это открытие заслуживает упоминания и с исторической точки зрения. Поскольку конденсация требует охлаждения пара, Уатт был первым, кто понял, что расширение пара вызывает его охлаждение. Конденсация происходила также в объеме пара, без влияния твердой поверхности, что сегодня известно как гомогенный фазовый переход. Образование жизнеспособных ядер новой фазы (мельчайших капелек воды) в таких условиях требует сильной метастабильности, которая измеряется в терминах переохлаждения ⁵³. Подобные эксперименты в этой области (охлаждение газов путем расширения) были выполнены спустя пять десятилетий Джоулем. В статье Джоуля, которая вошла в историю термодинамики как первое открытие адиабатического охлаждения, имя Уатта не упоминается ⁵⁴.

Диаграмма давления расширяющегося пара на рис. 10 не удовлетворила своего создателя Уатта, поскольку она не дает никакой информации о динамике расширения, наука того времени подобные данные предоставить также не могла. Уатту снова потребовалось разработать измерительное устройство, на этот раз такое, которое должно было измерять давление пара в цилиндре в зависимости от положения поршня. Таким образом, он разработал, построил и использовал в экспериментах прибор — индикатор давления — для визуализации динамики изменения давления в паровом цилиндре. Диаграммы на рис. 11 были записаны с таким индикатором давления, принцип работы которого основан на идеях Уатта.

Когда пар конденсируется путем адиабатического расширения, он охлаждается, и тепло, соответствующее охлаждению, должно быть преобразовано в работу, взятую из пара, и работу, выполняемую внутри пара. Внутренняя работа охватывает работу сил притяжения, действующих между молекулами пара при увеличении их взаимного расстояния в процессе расширения. Внешняя работа возникает от внешних сил (сопротивления), действующих против расширения пара. Если пренебречь на данный момент внутренними сопротивлениями (молекулярным взаимодействием), то потребляемая энергия, которую мы воспринимаем как охлаждение и которая обеспечивает только работу внешних сил сопротивления, может быть понята как полезная работа, выполняемая паром. Это означает, что внешняя работа выполняется

⁵² *Miller, D. Ph.* The Mysterious Case of James Watt's "1785" Steam Indicator': Forgery or Folklore in the History of an Instrument? // *International Journal for the History of Engineering & Technology*. 2011. Vol. 81. No. 1. P. 130–131.

⁵³ Джеймс Уатт экспериментально установил метастабильные состояния (переохлажденный пар) на восемь десятилетий ранее, чем Т. Эндрюс и Дж. Томсон (см. *Andrews, The Bakerian Lecture...*; *Thomson, Continuity of the Fluid and Gaseous States of Matter...*).

⁵⁴ *Darwin, E.* Frigorific Experiments on the Mechanical Expansion of Air // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1788. Vol. 78. P. 43–52; *Joule, J. P.* On the Changes of Temperature Produced by the Rarefaction and Condensation of Air // *The Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1845. Vol. 26. No. 174. P. 369–383.

за счет *уменьшения* внутренней энергии. Эта простая модель иллюстрирует преобразование тепла во внешнюю работу. Если мы теперь примем во внимание проигнорированную внутреннюю работу и дополнительно допустим некоторые тепловые потери в окружающую среду, то тепло, преобразуемое во внешнюю работу, будет меньше. Модель объясняет причину, по которой Уатт сделал все, чтобы уменьшить тепловые потери своего парового двигателя. Эта простая модель визуализирует и отвечает на вопрос о тепловых потерях, заданный выше, почему для Уатта было так важно уменьшить тепловые потери от пара. Кроме того, модель показывает слабость идеи Карно относительно сохранения тепла в работающем паровом двигателе. Заметим, что скрытая теплота конденсации в некоторой степени уменьшает паровое охлаждение.

3. Патент Джеймса Уатта № 913 от 1769 г.

Этот патент изменил развитие как общества, так и промышленности, особенно в Великобритании, на рубеже XVIII–XIX вв. Это первый патент Уатта. Для него Уатт использовал название «Способ снижения расхода пара и топлива в паровых машинах» и уже в самом начале определил характер патента: «Мой метод снижения расхода пара, а следовательно, и топлива в паровых машинах состоит из следующих принципов». Одним этим утверждением патент выходил за рамки действующего патентного права. Для более детального понимания этого утверждения мы сошлемся на автора, который показывает, почему патент не попал в рамки действующего единого патентного закона:

Закон гласит, что не может быть патента на принцип, и, соответственно, право собственности на изобретение, которое произвело революцию в механической промышленности всего мира, едва не было отвергнуто из-за технического возражения, что [для патентования] был заявлен принцип действия, а не определенное изделие; и только после долгой борьбы вопрос был решен в пользу изобретателя. Суд общей юрисдикции не смог прийти к какому-либо решению, но возражение было окончательно снято благодаря здравому смыслу лорда Кеньона, который заметил: «Я не сомневаюсь, что это патент на изделие, под которым я понимаю нечто сделанное руками человека»⁵⁵.

Патентные формулы были предметом споров, обсуждаемых в литературе относительно прогресса технологического развития, в частности, технологии пара высокого давления. Содержание патента трактуется по-разному, в основном как усовершенствование парового двигателя. Это, конечно, слишком узко и как таковое неприемлемо, потому что уже название патента относится к способу, а не к какому-либо отдельному компоненту парового двигателя. Собственно, этот патент касается общего процесса преобразования энергии. Он относится к области энергетики и термодинамики. Патент не содержит ни чертежей, ни подробного описания из-за опасения

⁵⁵ *Goodeve, T. M. Textbook the Steam Engine with a Supplement on Gas Engines. 9th ed. London: Crosby Lockwood and Co., 1888. P. 22.*

пиратства. В этой связи следует отметить, что Уатт любой шаг, который был заявлен в патенте, доказывал в лабораторных экспериментах, чтобы убедиться в обоснованности своей идеи. Несмотря на то, что идея, изложенная в патенте, была завершена в 1765 г., Уатт не подавал заявки на патент до 1768 г. Он был издан в 1769 г., истек в 1800 г. и действовал в общей сложности более 31 года.

В патенте описан универсальный метод преобразования энергии. Наши современные угольные, атомные и гидроэлектростанции, двигатели внутреннего сгорания — все они работают на принципах, изложенных в патенте Уатта. Он также содержит в себе часть основных положений современной термодинамики. Следует признать, что Карно пользовался в своей работе результатами Уатта, но, может быть, в силу сложившейся традиции не считал необходимым выделить эти научные достижения. Ниже приводится интерпретация и объяснение патента Уатта, требующие пересмотра некоторых взглядов на генезис классической термодинамики.

Из содержания этого патента мы можем заключить, что Уатт был очень хорошо знаком с принципами сохранения энергии и ее преобразования из одной формы в другую. В патенте Уатт заявляет:

Мой метод [...] состоит из следующих принципов:

Во-первых, сосуд, в котором сила пара должна использоваться для работы двигателя, который называется цилиндром в обычных паровых машинах и который я называю паровым сосудом, должен в течение всего времени работы двигателя оставаться таким же горячим, как и пар, который входит в него, добиться чего можно, во-первых, заключив его в корпус из дерева или любых других материалов, которые медленно передают тепло; во-вторых, окружив его паром или другими нагретыми телами; и, в-третьих, не позволяя ни воде, ни любому другому веществу, более холодному, чем пар, входить в него или касаться его в течение этого времени⁵⁶.

Согласно Уатту, не тепло, а энергия пара приводит двигатель в движение и преобразуется в работу. Под термином мощности Уатт понимал прежде всего потенциальную энергию пара, которая может быть выражена как произведение его давления и объема. Карно принял это требование в своей работе 1824 г. для изотермического расширения пара. Если считать, что рабочее вещество — это идеальный газ, то постоянная температура требует постоянства потенциальной энергии ($pv = RT = \text{const}$), это может быть достигнуто путем подачи тепла. Величины p и v могут изменяться, но обратно и с той же скоростью. Хотя Уатт был хорошо знаком со значением давления, он ничего не знал о термодинамическом значении высокой температуры без высокого давления. Равность температур пара и цилиндра должна была обеспечить абсолютное тепловое отделение цилиндра от окружающей среды и реализацию адиабатических условий и изоэнтропических условий в предельном случае идеальной жидкости, для которой эти условия были приняты Карно.

⁵⁶ Specification of Patent, January 5th, 1769, for a New Method of Lessening the Consumption of Steam and Fuel in Fire Engines // *Muirhead. The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt...* Vol. 3. P. 13.

Во-вторых, в двигателях, которые должны работать полностью или частично путем конденсации пара, пар должен конденсироваться в сосудах, отличных от паровых сосудов или цилиндров, хотя иногда сообщающихся с ними; эти сосуды я называю конденсаторами; и пока двигатели работают, эти конденсаторы должны по крайней мере оставаться такими же холодными, как воздух вокруг двигателей, путем применения воды или других холодных тел ⁵⁷.

Отдельный сосуд Уатта стал позже известен как отдельный конденсатор. С его введением Уатт запатентовал процесс общего действия для преобразования энергии. Этот патент не является, как обычно заявляют, патентом на усовершенствование паровых двигателей, он гораздо шире и включает также паровую машину. Уатт утверждает, что температура конденсации пара (и, следовательно, давление в конденсаторе) должны поддерживаться на как можно более низком уровне. По соображениям безопасности (взрыв паровых котлов при более высоких давлениях) Уатт ограничил температуру пара таким образом, чтобы его давление лишь немного превышало атмосферное. Благодаря этому Уатт четко определил диапазон температур пара для работы паровых двигателей. Примерно 60 лет спустя, в 1824 г., Карно дал точно такое же определение рабочего температурного диапазона, не упоминая его создателя Уатта.

Как выяснилось позже, Уатт был прав относительно ограничения максимальной температуры пара в котле, поскольку в 1830 г. на одних только американских пароходах произошло почти 60 взрывов котлов, в результате которых погибло более 300 человек ⁵⁸.

В-третьих, любой воздух или другой упругий пар, который не конденсируется холодом конденсатора и может препятствовать работе двигателя, должен удаляться из паровых сосудов или конденсаторов посредством насосов, приводимых в действие самими двигателями, или иным образом ⁵⁹.

Здесь Уатт упоминает очень сложную проблему конденсации пара в присутствии посторонних газов, которая будет рассматриваться глубже спустя столетие. При движении конденсируемого компонента к охлаждающей поверхности он увлекает в том же направлении посторонние компоненты, которые, будучи неконденсируемыми, накапливаются в газовой фазе вблизи поверхности конденсата. Конденсируемый пар должен пересечь этот слой, что возможно только при медленной диффузии пара. Мы не нашли ни одной статьи по этому вопросу, написанной Уаттом, но, как следует из этого описания, он знал о замедляющем влиянии массопереноса на кинетику фазовых превращений.

В-четвертых, я намереваюсь во многих случаях использовать расширяющую силу пара для давления на поршни или что-либо другое, что может быть использовано вместо них, таким же образом, каким давление атмосферы

⁵⁷ Ibid.

⁵⁸ Fox. Anmerkungen zum Text der "Betrachtungen"... S. 70; Carnot. Reflexions on the Motive Power of Fire...

⁵⁹ Specification of Patent, January 5th, 1769... P. 13.

используется теперь в обычных паровых машинах. В тех случаях, когда холодной воды нет в достаточном количестве, двигатели могут быть приведены в действие только этой силой пара, путем выпуска пара в атмосферу после того, как он выполнил свою работу ⁶⁰.

Здесь Уатт утверждает: а) что он использует расширение пара в качестве рабочего режима паровой машины. Это выглядит как предсказание паровой машины двойного действия, запатентованной позднее, около 1782 г.; б) что рабочее вещество не обязательно должно совершать замкнутый цикл в двигателе, но может участвовать в открытом процессе и выбрасываться из двигателя без конденсации. Этот метод был широко использован позже в мобильных паровых машинах.

В-пятых, там, где требуется движение вокруг оси, я делаю паровые резервуары в виде полых колец или круглых каналов с соответствующими входами и выходами для пара, установленными на горизонтальных осях как колеса водяной мельницы; внутри них помещается ряд клапанов, которые позволяют любому телу двигаться вокруг канала только в одном направлении. В эти паровые сосуды помещаются грузы, установленные таким образом, чтобы полностью их заполнить или заполнить часть их каналов, но способные свободно перемещаться в них с помощью указанных здесь средств – после того, как они упомянуты или указаны. Когда пар поступает в эти двигатели между грузами и клапанами, он действует одинаково на них, так чтобы поднять груз на одну сторону колеса и посредством реакции на клапаны последовательно придать колесу круговое движение, причем клапаны открываются в том направлении, в котором грузы прижимаются, но не наоборот. По мере того как паровой резервуар движется вокруг него, он снабжается паром из котла, и пар, который выполнил свою функцию, может быть выведено либо с помощью конденсаторов, либо в открытый воздух ⁶¹.

Эта идея менее важна для нашей темы, но она показывает изобретательность Уатта в области конструктивного решения сложных механических задач. Именно здесь проявляются его опыт и способности создателя математических инструментов.

В-шестых, я намереваюсь в некоторых случаях применять степень холода, не способную свести пар к воде, но значительно сжать его, так что двигатели будут работать за счет попеременного расширения и сжатия пара ⁶².

Эта идея в принципе осуществима, но сомнительна с экономической точки зрения, по крайней мере она слишком кратко описана в патенте. Об опорожнении цилиндра ничего не говорится. Вероятно, во времена Уатта никто этого не понимал. Во всяком случае, она выражает способность Уатта анализировать сложные процессы и их взаимное взаимодействие.

⁶⁰ Ibid. P. 13–14.

⁶¹ Ibid. P. 14.

⁶² Ibid. P. 14–15.

Наконец, вместо того, чтобы использовать воду для герметизации поршней и других воздухо- и паронепроницаемых частей двигателя, я использую масла, воск, смолистые тела, жир животных, ртуть и другие металлы в их жидком состоянии ⁶³.

Поршень в двигателе Ньюкомена был покрыт слоем воды, который отделял его от стенки цилиндра и предотвращал попадание воздуха в паровой цилиндр. Эта вода испарялась и ее приходилось регулярно пополнять. Уатт правильно понимал эффекты охлаждения поршня и конденсации пара внутри цилиндра как потери тепла и пара, которые должны были быть предотвращены. Поэтому Уатт использовал низколетучее, жирное вещество для уменьшения потерь на трение.

Этот патент свидетельствует об обширных знаниях его автора в области термодинамики. Просто невероятно, что Уатт приобрел их всего за несколько лет. Достаточно вспомнить эмоциональные слова Ренкина о том, что с помощью Уатта «наука вошла в паровой двигатель» и что Уатт сделал за несколько лет больше, чем человечество за два тысячелетия.

Заключение

Джеймс Уатт известен прежде всего как изобретатель парового двигателя. В его время считалось, что эта профессия не требовала значительных научных знаний. С исторической точки зрения это мнение вполне объяснимо, поскольку шаг от рабочего до изобретателя зачастую был не так уж велик. Это также относится к Уатту, который в школьные годы прошел обучение в качестве мастера по изготовлению инструментов. Но систематическое обучение не закончилось для Уатта начальной и средней школой, его всегда интересовало образование, сравнимое с университетским.

Менее известны (по крайней мере они почти не упоминаются в литературе) знания Уатта научного характера. Сегодня, как и тогда, Уатт не признан как ученый, хотя его анализ многих процессов, например тех, которые протекали в его в новой модели парового двигателя, был выполнен на высоком научном уровне и привел его к ряду фундаментальных открытий. Эти факты продолжают игнорироваться и почти не упоминаются даже историками науки. Целью нашей работы было представить некоторые доказательства того, что идеи Уатта лежат в основе термодинамики, хотя он писал о них не научным, а техническим языком.

Уатт стремился понять зависимость потребления угля от мощности паровой машины Ньюкомена, что являлось задачей с определенными целями. Он не занимался чисто теоретическими исследованиями только потому, что они не казались ему достаточными для получения окончательных результатов. Он хотел понять истинные принципы эффективности двигателя, которые могли бы помочь ему спроектировать и построить паровые двигатели с более высоким КПД. Он не выбрал прямой путь, основанный на теоретических гипотезах, чтобы решить поставленный вопрос надежно, как это требуется

⁶³ Ibid. P. 15.

практике. Вместо этого он сделал промежуточный шаг, создав модель для экспериментальных исследований, основанных на теоретических знаниях. Результаты, полученные с помощью этой модели, затем нужно было подтвердить на практике. Уатт был одним из первых ученых, которые дополнили практику (эксперимент) теорией в соответствии с идеей Фрэнсиса Бэкона, согласно которой научные методы должны основываться на наблюдении и эксперименте. Он рассматривал свою модель не как настоящий паровой двигатель, а как инструмент, который должен быть усовершенствован. Таким образом, модель работала как воплощение улучшаемой теории, которая представляет и описывает объект.

В настоящей работе затрагиваются лишь некоторые аспекты вклада Уатта в термодинамику. Многие из его идей не рассматриваются, среди них аналогия импульсного стекла и паровой машины, а также огромное значение индикатора давления для практики преобразования энергии и теории термодинамики. Его метод преобразования энергии, как указано в его патенте 1769 г., охватывает все способы преобразования энергии. Его усилия по предотвращению тепловых потерь в паровом двигателе подчеркивают его идею о преобразовании тепла в механическую энергию (работу). Более чем полвека спустя Карно утверждал, что тепло передается только в паровой машине, не принимая участия в создании работы в паровом цилиндре. Очевидно, что Карно не принял или не понял идеи Уатта этой области, но он использовал данные Уатта по определению температурных границ работы паровой машины, не упоминая при этом Уатта.

Большое научное значение имеет также наблюдение Уаттом в 1785 г. конденсации расширяющегося пара в паровом цилиндре. Поскольку конденсация пара является следствием охлаждения пара при расширении, то в этом смысле исследования Уатта на много десятилетий опередили работы Джоуля по охлаждению газов и преобразованию тепла в работу. Все достижения Уатта приходится на период времени, предшествующий работам следующего поколения ученых в области термодинамики, возглавляемых Клапейроном, Джоулем, Ренкином, У. Томсоном (лордом Кельвином) и т. д. Правоммерно встает вопрос: почему достижения Уатта не были должным образом признаны учеными, которые считаются создателями термодинамики как науки? Оставим ответ на этот вопрос читателю. Мы лишь сообщим ему некоторые факты, которые помогут ему прийти к собственным выводам. Клапейрон «обнаружил» и дополнил работу Карно в 1834 г., спустя десять лет после ее публикации. Клапейрон не упомянул об идеях Уатта. У. Томсон сначала прочел работу Клапейрона, а потом работу Карно. Идеи Уатта опять не были приняты во внимание.

Когда читаешь доклады об Уатте Джоуля и У. Томсона, то создается впечатление, что эти ученые прекрасно осознавали существовавшее пренебрежение идеями Уатта, но не помогли Уатту войти в их круг как ученому. Так, Джоуль в своей лекции в 1865 г. представил Уатта в качестве ученика. Очевидно, Джоуль не желал признавать, что паровые двигатели изначально были основаны на принципе эквивалентности тепловой энергии и механической работы. Руководствуясь этим принципом, Уатт, в частности, пытался

уменьшить тепловые потери в паровых двигателях. В конце доклада, посвященного главным образом собственным работам Джоуля, он упоминает Уатта только как пионера развития термодинамики ⁶⁴.

У. Томсон утверждал, что

...когда вы можете измерить то, о чем говорите, и выразить это в цифрах, вы что-то знаете об этом; но, когда вы не можете измерить это, когда вы не можете выразить это в цифрах, ваше знание скудно и неудовлетворительно ⁶⁵.

Эта цитата дает четкую оценку эксперимента в науке по сравнению с теорией. Джеймс Уатт делал модели и измерял, и заслуживает того, чтобы его считали ученым.

Один из авторов настоящей статьи, Й. Митрович, выражает искреннюю благодарность профессору Кристине Маклеод (Бристольский университет, Великобритания) за предоставление копий некоторых литературных источников.

References

- Andrews, Th. (1869) The Bakerian Lecture: On the Continuity of the Gaseous and Liquid States of Matter, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 159, pp. 575–590.
- Cardwell, D. S. L. (1971) *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Carnegie, A. (1905) *James Watt*. New York: Doubleday, Page & Company.
- Carnot, S. (1824) *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris: Bachelier.
- Carnot, S. (1986) *Reflexions on the Motive Power of Fire. A Critical Edition with the Surviving Scientific Manuscripts*. Manchester: Manchester University Press and New York: Lilian Barber Press, Inc.
- Clapeyron, É. (1834) Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur, *Journal de l'École royale polytechnique*, vol. 14, no. 23, pp. 153–190.
- Clark, D. K. (1852) Expansive Working of Steam in Locomotives, in: *Institution of Mechanical Engineers. Proceedings*. Birmingham: Published by the Institution, pp. 60–88, 109–131.
- Darwin, E. (1788) Frigorific Experiments on the Mechanical Expansion of Air, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 78, pp. 43–52.
- Desaguliers, J. T. (1744) *A Course of Experimental Philosophy*. London: Printed for W. Innys, M. Senex, T. Longman.
- Dickinson, H. W., and Jenkins, R. (1927) *James Watt and the Steam Engine*. Oxford: Clarendon Press.
- Edelstein, S. M. (1948) Priestley Settles the Water Controversy, *Chymia*, vol. 1, pp. 123–137.
- Farey, J. (1827) *A Treatise on the Steam Engine, Historical, Practical, and Descriptive*. London: Printed for Longman, Rees, Orme, Brown, and Green.
- Fox, R. (1970) Watt's Expansive Principle in the Work of Sadi Carnot and Nicolas Clément, *Notes and Records of the Royal Society of London*, vol. 24, no. 2, pp. 233–253.

⁶⁴ См.: Miller, D. Ph. James Watt, Chemist: Understanding the Origins of the Steam Age. Pittsburgh: Pittsburgh University Press, 2016. Chapter VI.

⁶⁵ Thomson, W. Electrical Units of Measurement. A Lecture Delivered at the Institution of Civil Engineers on May 3, 1883// Thomson, W. Popular Lectures and Addresses. In 3 vols. London: Macmillan and Co., 1889. Vol. 1. P. 73–136.

- Fox, R. (1988) Anmerkungen zum Text der “Betrachtungen”, in: Carnot, S. *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen*. Braunschweig and Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.
- Goodeve, T. M. (1888) *Textbook on the Steam Engine with a Supplement on Gas Engines*. 9th ed. London: Crosby Lockwood and Co.
- Gvozdetskii, V. L. (1987) Formirovanie teorii parovoi mashiny [Formation of Steam Engine Theory], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, no. 2, pp. 102–112.
- Hiebert, E. (1959) Commentary, in: Clagett, M. (ed.) *Critical Problems in the History of Science. Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin, September 1–11, 1957*. Madison: University of Wisconsin Press, pp. 391–398.
- Holland, R. S. Historic Inventions. Chapter IV. Watt and Steam Engine, <http://gutenberg.readingroo.ms/4/2/5/1/42517/42517-h/42517-h.htm#IV>.
- Joule, J. P. (1845) On the Changes of Temperature Produced by the Rarefaction and Condensation of Air, *The Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 26, no. 174, pp. 369–383.
- Jungnickel, C., and McCormmach, R. (2016) Cavendish: The Experimental Life. 2nd ed., <http://edition-open-access.de/studies/7/>.
- Kamenskii, A. V. (1891) *Dzheims Uatt. Ego zhizn' i nauchno-prakticheskaya deiatel'nost' [James Watt. His Life and Scientific and Practical Work]*. Sankt-Peterburg: Tipografiia gazety “Novosti”.
- Karno, S. (Carnot, S.) (1923) *Razmyshleniia o dvizhushchei sile ognia i o mashinakh, sposobnykh razvivat' etu silu [Reflections on the Motive Power of Fire, and on Machines Fitted to Develop That Power]*. Moskva and Leningrad: Gostekhizdat.
- Konfederatov, I. Ia. (1969) *Dzheims Uatt [James Watt]*. Moskva: Nauka.
- Kuhn, Th. (1959) Energy Saving as an Example of Simultaneous Discovery, in: Clagett, M. (ed.) *Critical Problems in the History of Science. Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin, September 1–11, 1957*. Madison: University of Wisconsin Press, pp. 321–356.
- Miller, D. Ph. (2002) ‘Distributing Discovery’ between Watt and Cavendish: A Reassessment of the Nineteenth-Century ‘Water Controversy’, *Annals of Science*, vol. 59, no. 2, pp. 149–178.
- Miller, D. Ph. (2004) *Discovering Water: James Watt, Henry Cavendish and the Nineteenth-Century “Water Controversy”*. Aldershot and Burlington: Ashgate.
- Miller, D. Ph. (2004) True Myths: James Watt’s Kettle, His Condenser and His Chemistry, *History of Science*, vol. 42, no. 3, pp. 333–360.
- Miller, D. Ph. (2011) The Mysterious Case of James Watt’s “1785” Steam Indicator’: Forgery or Folklore in the History of an Instrument? *International Journal for the History of Engineering & Technology*, vol. 81, no. 1, pp. 130–131.
- Miller, D. Ph. (2016) *James Watt, Chemist: Understanding the Origins of the Steam Age*. Pittsburgh: Pittsburgh University Press.
- Muirhead, J. P. (1854) *The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt*. London: John Murray, vol. 3.
- Muirhead, J. P. (ed.) (1846) *Correspondence of the Late James Watt on His Discovery of the Theory of the Composition of Water*. London: John Murray and Edinburgh: William Blackwood and Sons.
- Newton, I. (1730) *Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. 4th ed. London: Printed for William Innys at the West-End of St. Paul’s.
- Pacey, A. J. (1974) Some Early Heat Engine Concepts and the Conservation of Heat? *The British Journal for the History of Science*, vol. 7, no. 2, pp. 135–145.
- Papin, D. A (1681) *New Digester for Softening Bones [...]*. London: Printed by J. M. for Henry Bonwicke.
- Radtsig, A. A. (1924) *Dzheims Uatt i izobretenie parovoi mashiny [James Watt and the Invention of the Steam Engine]*. Petrograd: Nauchnoe khimiko-tekhnicheskoe izdatel'stvo. Nauchno-tekhnicheskii otdel VSNKh.
- Radtsig, A. A. (1936) *Istoriia teplotekhniki [History of Thermal Engineering]*. Moskva and Leningrad: Izdatel'stvo AN SSSR.
- Rankine, W. J. M. (1869) *A Manual of the Steam Engine and other Prime Movers*. 4th ed. London: Charles Griffin and Company.

- Robison, J. (1822) *A System of Mechanical Philosophy. In 4 vols.* Edinburgh: Printed for John Murray, London, vol. 2.
- Smiles, S. (1865) *Lives of Boulton and Watt.* London: John Murray.
- Smith, C. W. (1977) William Thomson and the Creation of Thermodynamics: 1840–1855, *Archives for the History of Exact Sciences*, vol. 16, pp. 231–288.
- Smyk, A. F. (2019) Teoriia teplovoi mashiny v trudakh S. Karno i B. Klapeirona [Heat Engine Theory in the Works of S. Carnot and B. Clapeyron], *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, no. 1 (19), p. 22.
- Smyk, A. F., and Kuz'mina, N. B. (2019) Analogii v postroenii fenomenologicheskoi teorii ideal'noi teplovoi mashiny [The Analogies in the Construction of the Phenomenological Theory of an Ideal Heat Engine], *Istoriia nauki i tekhniki*, no. 6, pp. 3–9.
- Steam (1832), in: Brewster, D. (ed.) *The Edinburgh Encyclopaedia.* Philadelphia: Joseph Parker, vol. 17, pp. 390.
- Stuart, R. (1829) *A Descriptive History of the Steam Engine.* London: Whittaker, Treacher, and Arnot.
- Thomson, J. (1871) Continuity of the Fluid and Gaseous States of Matter, *Nature*, vol. 5, no. 110, pp. 106–108.
- Thomson, W. (1889) Electrical Units of Measurement. A Lecture Delivered at the Institution of Civil Engineers on May 3, 1883, in: Thomson, W. *Popular Lectures and Addresses. In 3 vols.* London: Macmillan and Co., vol. 1, pp. 73–136.
- Thorpe, E. (ed.) (1921) *The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish.* Cambridge: Cambridge University Press, vol. 2: Chemical and Dynamical Works.
- Thurston, R. H. (1886) *A History of the Growth of the Steam-Engine. 2nd ed.* New York: D. Appleton and Company.
- Watt, J. (1784) Thoughts on the Constituent Parts of Water and of Dephlogisticated Air; With an Account of Some Experiments on That Subject; Letter from Mr. James Watt to Mr. De Luc, F. R. S., *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 74, pp. 329–353.
- Wilson, G. (1851) *The Life of the Hon^{ble} Henry Cavendish, Including Abstracts of His More Important Scientific Papers, and a Critical Inquiry into the Claims of All the Alleged Discoverers of the Composition of Water.* London: Printed for the Cavendish Society.

Received: November 12, 2020.