

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КВАДРАТИЧНОГО ЗАКОНА СОПРОТИВЛЕНИЯ В РУДНИЧНОЙ АЭРОЛОГИИ

М.А. Семин, Горный институт УрО РАН
Г.З. Файнбург, Горный институт УрО РАН

Для цитирования:

Семин М.А., Файнбург Г.З. История открытия и применения квадратичного закона сопротивления в рудничной аэрологии // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 3. – С. 25–32. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.3.2>

Закон сопротивления (или закон Дарси–Вейсбаха), устанавливающий квадратичную зависимость потерь напора на трение от средней скорости воздушного потока, лежит в основе математического аппарата современной аэрологии горных предприятий. Несмотря на обилие научных работ, посвящённых истории шахтной вентиляции и горного дела в целом, вопрос о первооткрывателе и первом применении данного закона в рудничной вентиляции остаётся неясным. В настоящей статье представлен краткий исторический обзор, направленный на выяснение, когда и кем квадратичный закон сопротивления был впервые введен в практику вентиляции шахт.

Ключевые слова: рудничная аэрология, история науки, закон сопротивления, горные выработки, закон Дарси–Вейсбаха.

Введение

В современной научной литературе, посвящённой вентиляции шахт и рудников, нередко подчёркивается, что рост мощности добычи полезных ископаемых требует применения всё более сложных математических методов для анализа и проектирования вентиляционных систем [1, 2]. Распространено мнение, что подобные подходы являются относительно недавним явлением, характерным исключительно для нашей эпохи. Однако анализ работ по горному делу, опубликованных в начале XIX века [3], а также отечественных источников по рудничной вентиляции начала XX века [4], позволяет обнаружить сходные тезисы. Уже тогда

отмечались ускоренное развитие промышленности, увеличение объёмов горных работ и ограниченность устаревших методов проветривания в условиях роста производительности, необходимость применения научных знаний для разработки новых подходов к проветриванию.

Индустриализация, охватившая разные страны в различные исторические периоды, стала основным фактором этих изменений. Так, первая промышленная революция, проходившая в Великобритании в 1760–1840 гг., была тесно связана с активным развитием угледобычи и металлургии. Этому способствовали обильные запасы каменного угля и железной руды, особенно в таких регионах, как

«Чёрная страна» (Black Country) – в одном из первых индустриальных центров мира [5].

Стремительный рост объемов добычи полезных ископаемых естественно привёл к тому, что существовавшие на тот момент способы вентиляции шахт оказались недостаточно эффективными и безопасными. Резко выросло число забоев, а также количество метана, выделяющегося при ведении горных работ. Рудничная вентиляция перестала справляться с подачей достаточного количества свежего воздуха. Теоретические представления о свойствах взрывоопасных газовоздушных смесей только начинали зарождаться, а практика шла методом проб и ошибок. В шахтах всё чаще происходили взрывы и вспышки метана [3, 6]. А потребность в каменном угле и металлических рудах только росла. Все это стимулировало поиск новых технических решений организации рудничной вентиляции, требовавших не только практической сметки и интуиции, но и системного научного подхода к описанию и количественной оценке движения воздуха в горных выработках.

Именно в этот период, в условиях остро возникшей практической потребности, впервые был предложен и внедрён в горную практику эмпирический закон, известный сегодня как закон сопротивления (который в некоторых источниках также называют законом Дарси-Вейсбаха, реже – формулой Аткинсона). Этот закон устанавливает квадратичную зависимость потери давления на трение в горной выработке от расхода (или средней скорости) воздуха. Он стал фундаментом для расчёта вентиляционных сетей шахт и рудников и остаётся актуальным до настоящего времени. На его основе работают совре-

менные отечественные и зарубежные программные комплексы, такие как «Аэро-сеть», «Вентиляция 2.0», «VentSim», «VnetPC», «Vuma» и др.

Несмотря на наличие множества научных статей об истории данного закона [7, 8], монографий об истории горного дела и рудничной вентиляции [1, 9], вопрос о том, кто именно впервые открыл и применил данный закон в рудничной вентиляции, остаётся открытым. Установление исторической первоосновы этого важнейшего положения рудничной аэрологии являлось целью настоящего исследования, которое проводилось на основании работ с архивными данными открытых источников^{1,2} и библиотек³.

Развитие рудничной вентиляции в период индустриализации

До изобретения в середине XIX века механического вентилятора, способного проветривать подземные горные выработки, все шахты проветривались только за счет естественной тяги, возникающей из-за сил плавучести, вызванных разностью температур в стволах [10]. Регулирование поступающего для проветривания воздуха означало в то время интенсификацию естественной тяги. Поэтому в период индустриализации в Великобритании начали внедряться специальные вентиляционные печи, которые интенсифицировали движение воздуха за счёт нагрева выходящего воздуха в вентиляционном стволе. Это позволило увеличить объёмы подаваемого воздуха в шахты на два порядка. Однако вскоре выявились новые проблемы: высокая концентрация взрывоопасных газов в воздушном потоке, проходящем через печь, нередко приводила к взрывам воздушно-газовой смеси и разрушению печи (а зачатую и ствола).

¹ <https://archive.org>

² <https://Annales.ensmp.fr>

³ <https://www.rsl.ru/>

Для решения этой проблемы горный инженер Джон Баддл (1773–1843) решил разделить потоки загазованного воздуха – исходящего воздуха шахт и относительно чистого свежего воздуха, поступающего к вентиляционному стволу, минуя рабочие зоны, – и внедрил в практику так называемые «глухие штреки» (dumb drifts) – специальные выработки, отводившие часть свежего воздуха от основания ствола к печи. Благодаря этому загрязнённый воздух, насыщенный метаном, обходил зону горения [11].

Кроме того, именно Баддл впервые предложил разделять общий приточный поток воздуха на отдельные автономные потоки, направляемые в разные участки шахты по разным выработкам. До этого, согласно многовековой традиции, воздух последовательно проходил через все рабочие зоны, но при этом концентрация метана возрастала по мере продвижения потока слишком сильно. Новый принцип, получивший название раздельной (или панельной) вентиляции, был внедрён не сразу – он противоречил представлениям многих опытных шахтёров, которые испытывали «ужас перед разделением потока воздуха, поскольку каждое разделение или раскол ослабляло основной поток» [3]. Эти опасения были частично оправданы, поскольку естественная тяга даже одного основного потока была очень слаба, и деление этого потока на несколько маршрутов ослабляло каждый поток, противоречило основной идее вентиляции: воздух должен всюду непрерывно двигаться [12].

Впервые эту систему – сегодня называемую системой автономного проветривания – применили на английской шахте Уолсенд в 1810 году. Для поддержания баланса между раздельными потоками в разных участках шахты использовались вентиляционные двери и регуляторы, контролирующие скорость движения воз-

духа. Уже в то время применялись примитивные приборы для оценки величины расхода воздуха – например, тонкая деревянная пластинка, подвешенная на верёвке и отклоняющаяся от вертикали под действием потока [6]. Регулирование распределения воздуха между параллельными направлениями осуществлялось эмпирически путем подбора положения регуляторов.

Позднее, в 1830–1840-х годах, на шахтах начали внедряться механические вентиляторы. Согласно источнику [3], сначала это произошло в Бельгии, а затем – в Англии. По данным [6], первый вентилятор в Великобритании был установлен в 1827 году и приводился в действие паровой машиной.

Появление методов расчета течений в каналах и их внедрение в рудничную вентиляцию

Необходимость расчёта параметров работы вентиляторов стала ещё одной предпосылкой для разработки теоретических основ, связывающих потери давления в вентиляционной сети с объёмом воздуха, подаваемого в шахту.

В работе [11] указывается, что первым, кто применил закон Дарси–Вейсбаха (в то время он так не назывался и был практически никому не известен) для шахтной вентиляции, был английский инспектор шахт Джон Аткинсон. В своём труде по вентиляции шахт [13], опубликованном в 1854 году, он сформулировал зависимость, связывающую потери давления на трение со средней скоростью потока u в горной выработке:

$$pA = kP\rho u^2, \quad (1)$$

где p – потери давления в расчете на единицу длины выработки, k – коэффициент трения Аткинсона, P – периметр горной выработки, ρ – плотность потока, A – площадь поперечного сечения горной выработки.

К сожалению, аналитический аппарат и математические выкладки, предложенные Аткинсоном, оказались существенно опережающими практику того времени и не были востребованы практикующими инженерами своей эпохи. Поэтому его выдающаяся работа была фактически забыта и лишь через шестьдесят с лишним лет после смерти автора была «пероткрыта» и получила практическое применение.

Заметим, что в 1886 году Аткинсон опубликовал ещё одну работу [14], представляющую собой практическое руководство по регулированию газов в шахтах и общим принципам вентиляции. В ней также была приведена квадратичная зависимость для перепада давления в форме, аналогичной (1). Для учета общего падения давления в горной выработке результат, полученный из (1), следовало умножить на L – длину выработки. Впоследствии в формуле (1), называемой также формулой Аткинсона, длина была учтена уже явно [15].

Поскольку Аткинсон имел хорошую подготовку в области математики и иностранных языков, то, возможно, он знал работы французских инженеров, решавших задачи распределения потоков воды в гидравлических инженерных сооружениях (для каналов и фонтанов) и получивших аналогичную формулу квадратичного закона. В частности, в [11] упоминаются Антуан Шези и Анри Дарси. Обзор результатов Шези – одного из первых, кто эмпирически вывел выражение, аналогичное формуле (1), применительно к расчету открытых гидравлических каналов – можно найти как в его работе [16], так и в историческом обзоре [17].

Примечательно, что в своем фундаментальном труде [3] А.А. Скочинский при выводе своего квадратичного закона, связывающего падение давления и сред-

нюю скорость воздушного потока применительно к шахтной вентиляции, ссылается на труды французских инженеров д’Обюиссона (1825 г.) и Жирара (1826 г.). Закон падения давления воздушного потока на сопротивлениях трения, представленный А.А. Скочинским, имеет уже современный вид:

$$h = \frac{\alpha PL}{S} v^2, \quad (2)$$

где h – перепад давлений в горной выработке, α – коэффициент сопротивления трения, S – площадь поперечного сечения, P – периметр выработки, v – средняя скорость потока в выработке. Отметим, что в работах (1) и (2) местами присутствуют разные обозначения одних и тех же физических величин – это сделано исключительно с целью привести формулы именно в таком символьном виде, в каком они были опубликованы изначально.

Если работы французских инженеров, включая Жирара, были посвящены расчету гидравлических сетей, то труд д’Обюиссона был сфокусирован на горном деле и проблемах рудничной вентиляции. Анализируя его работу [18], можно установить, что квадратичный закон (2) использовался им для оценки эффективности вентиляции шахт, а именно – для оптимизации подачи воздуха по металлическим трубопроводам, идущим от вентилятора к подземным участкам (см. рис.1). Таким образом, хотя д’Обюиссон и применил закон (2) к задачам рудничной вентиляции, объектом исследования в его работе был не закон движения воздуха по горным выработкам, а шахтные вентиляционные трубопроводы. Следовательно, д’Обюиссон был первым, кто использовал квадратичный закон для расчёта подачи воздуха в шахту. Но первым, кто применил этот закон непосредственно к описанию движения воздуха в горных выработках, следует считать, видимо, Аткинсона.

Французский инженер-гидравлик Жирар был первым, кто применил квадратичную зависимость перепада давления от средней скорости потока к расчету трубопроводов. Результаты его исследований [19] были доложены в Королевской академии наук еще в 1819 году, но опубликованы лишь в 1826 году. Вместе с этим, Дарси, чье имя носит формула, опубликовал свои труды значительно позднее – в 1856 году [20]. Тем не менее,

именно в работе Дарси была наиболее корректно интерпретирована и проанализирована основная причина потерь давления – шероховатость стенок трубопроводов, а не прилипание на стенках [7]. Впрочем, об истинной физической причине падения давления в трубопроводах ранее упоминал и немецкий математик Юлиус Вейсбах, однако в его труде 1845 года отсутствовала подтверждающая экспериментальная база [21].

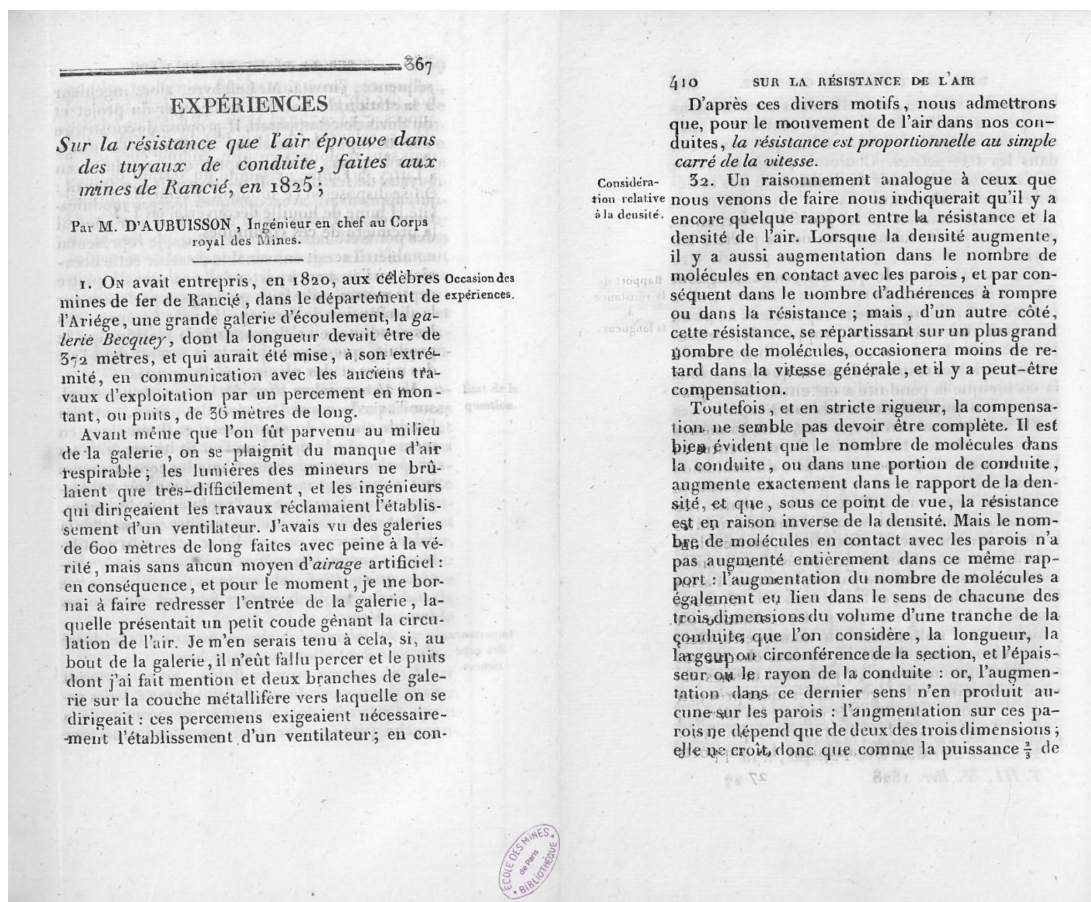


Рис.1. Фрагменты работы д'Обюиссона по расчету сопротивлений трубопроводов, используемых для подачи воздуха в шахту

Вместе с этим, следует отметить, что в трудах инженеров-гидравликов рассматриваемая формула чаще записывалась несколько иначе. Классическая форма записи формулы Дарси-Вейсбаха имеет вид [7, 10]:

$$h = \lambda \frac{L \rho v^2}{d \cdot 2}, \quad (3)$$

где d – диаметр круглого трубопровода, λ – гидравлический коэффициент потерь на трение. Эта запись была не очень удобна для практического применения в рудничной вентиляции по причине того, что горные выработки могли иметь поперечное сечение, сильно отличающееся от окружности. Именно по этой причине

потребовалось учесть форму горной выработки, включив в формулу соотношение периметра и площади поперечного сечения выработки.

Коэффициенты k , α , λ описывают один физический процесс (потери напора на сопротивлениях трения при турбулентном течении потока в канале) и связаны между собой линейными соотношениями:

$$\alpha = \frac{\lambda \rho S}{2dP}, \quad k = \frac{\alpha}{\rho} = \frac{\lambda S}{2dP}. \quad (4)$$

Заключение

В научной среде широко известен принцип Арнольда: «Если какое-либо понятие имеет персональное имя, то это – не имя первооткрывателя». Однако формула Дарси – Вейсбаха, на наш взгляд, не подтверждает этот принцип. Хотя квадратичная зависимость давления от скорости потока была впервые установлена Шези (для открытых каналов) и Жираром (для трубопроводов), именно Вейсбах дал строгое теоретическое обоснование причин потерь давления, а Дарси подтвердил его выводы экспериментально.

Применительно к вентиляции шахт этот закон впервые был использован д'Обюиссоном в 1828 году. Он применил формулу Дарси-Вейсбаха (которая в то время еще не имела такого названия) для оценки подачи воздуха на подземные участки горных работ через металлические трубопроводы. Впоследствии Аткинсон адаптировал эту формулу к условиям реальных горных выработок,

отличающихся выраженной шероховатостью стенок, тем самым заложив основы математического описания закономерностей движения воздуха в шахтах.

В то же время можно предположить, что интуитивное использование квадратичной зависимости между потерями давления и средней скоростью воздушного потока имело место ещё раньше – в частности, в работах Баддла. Его новаторская идея разделения воздушных потоков в шахтных выработках объективно требовала понимания того, как потоки распределяются в зависимости от сопротивлений различных участков вентиляционной сети. Однако письменных свидетельств, подтверждающих такое использование закона на практике в тот период, нам обнаружить не удалось. Поэтому данный вывод остаётся гипотезой.

В России формула, описывающая квадратичную зависимость потери напора от средней скорости воздуха, была впервые введена А.А. Скочинским, который опубликовал свою пионерскую работу [3] после продолжительной командировки по европейским странам в 1900–1904 годах [22]. Формула (2) в исходном виде до сих пор используется аэрологами как в России, так и за рубежом. Единственным элементом, подвергающимся уточнению, остаётся коэффициент сопротивления трения α , который корректируется с течением времени с учётом появления новых видов крепей и особенностей сопротивления в условиях увеличивающихся размеров горных выработок [1, 2].

Библиографический список

1. *Зайцев А.В.* Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дисс. ... д-ра техн. наук. 2019. – 247 с.
2. *Мальцев С.В.* Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дисс. ... канд. техн. наук. 2020. – 148 с.
3. *Galloway R.L.* A history of coal mining in Great Britain. London, Macmillan and co. 1882. – 302 с.
4. *Скочинский А.А.* Рудничный воздух и основной закон движения его. Санкт-Петербург : тип. П.П. Сойкина. – 1904. – 203 с.
5. *Marshall G.* The Making of the Black Country: A Unique Industrial Landscape. 2024.

6. *Unwin I.D., Phil M.* The measurement of air flow in British coal mines: A historical review // B. SC., DIS. 2007. – 93 с.
7. *Brown G.O.* The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance // Environmental and water resources history. – 2002. – с. 34-43.
8. *Eckert M.* Pipe flow: a gateway to turbulence // Archive for History of Exact Sciences. – 2020. – Т. 75, № 3. – с. 249-282.
9. *Gregory C.* A concise history of mining. New York: Pergamon Press. – 1980. – 290 с.
10. *Ломоносов М.В.* Полное собрание сочинений. Т.5: Труды по минералогии, металлургии и горному делу, 1741–1763. М.; Л.: Изд-во АН СССР. – 1954. – с. 397-631.
11. *McPherson M.J.* Subsurface Ventilation Engineering: Theory and Practice. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1993. – 905 с.
12. *Шламтер И.А.* Обстоятельное наставление рудному делу. СПб. – 1760. – 292 с.
13. *Atkinson J.* On the theory of the ventilation of mines. 1854. – 454 с.
14. *Atkinson J.* A practical treatise on the gases met with in coal mines and the general principles of ventilation. Newcastle-upon-Tyne, Andrew Reid. – 1886. – 84 с.
15. *Wabner R., Salter Ch.* Ventilation in mines. – London: Scott, Greenwood & Co.; New York: D. Van Nostrand Co; 1903. – 418 p.
16. *Chezy A.* Formule pour trouver la vitesse constante que doit avoir l'eau dans une rigole ou un canal dont la pente est donnée // Ann. Ponts Chaussées. 1776. – Т. 61. – с. 165-269.
17. *Ленихин А.П., Богомолов А.В.* К истории установления и современные представления об основной закономерности равномерного установившегося течения в водотоках (к 240-летию формулы А. Шези) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – №. 6. – с. 76-92.
18. *D'Aubuisson M.* Sur la résistance que l'air éprouve dans des tuyaux de conduite, faites aux mines de Rancié, en 1825 // Annales des Mines. – 1825. – с. 367-486.
19. *Girard M.* Mémoire sur l'écoulement uniforme de l'air atmosphérique et du gaz hydrogène carboné dans des tuyaux de conduit // Mémoires de l'Académie des sciences, 1826. – 1-26 с.
20. *Darcy H.* Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. – Paris: Victor Dalmont, 1856. – 664 с.
21. *Weisbach J.* Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik, Vol. 1. Theoretische Mechanik, Vieweg und Sohn, Braunschweig. – 1845. – 535 с.
22. *Ненина А.М.* Угль, пылающий огнем. Александр Александрович Скочинский. Библиографический очерк к 150-летию со дня рождения. – М.: Издательство «Горная книга», 2024. – 164 с.

HISTORY OF DISCOVERY AND APPLICATION OF THE QUADRATIC LAW OF RESISTANCE IN MINE AEROLOGY

Semin M.A., Fainburg G.Z.

Mining Institute UB RAS

For citation:

Semin M.A., Fainburg G.Z. History of discovery and application of the quadratic law of resistance in mine aerology // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 3. – P. 25–32. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.3.2>

The law of resistance (or the Darcy-Weisbach law) that establishes a quadratic dependence of pressure losses due to friction on the average air flow velocity is the basis of the mathematical apparatus of modern aerology of mining enterprises.

Despite the abundance of scientific works devoted to the history of mine ventilation and mining in general, the question of the discoverer and first application of this law in mine ventilation remains unclear. This article presents a brief historical review aimed at clarifying when and by whom the quadratic law of resistance was first introduced into the practice of mine ventilation.

Keywords: mine aerology, history of science, law of resistance, mine workings, Darcy-Weisbach law.

Сведения об авторах

Семин Михаил Александрович, доктор технических наук, заведующий лабораторией математического моделирования геотехнических процессов, ученый секретарь, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: seminma@inbox.ru

Файнбург Григорий Захарович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: faynburg@mail.ru

Материал поступил в редакцию 01.07.2025