

# Устройство водоаммиачного кондиционера автомобиля: модернизация конструкции генератора пара



**Е. И. Авксентьева,**  
старший преподаватель  
кафедры «Естествен-  
нонаучные дисциплины»  
Уральского государствен-  
ного университета путей  
сообщения (УрГУПС),



**Н. В. Буланов,**  
д-р физ.-мат. наук, про-  
фессор кафедры «Естест-  
веннонаучные дисциплины»  
УрГУПС

Важнейшим направлением развития транспортных средств является повышение их энергоэффективности и экологичности, в том числе путем использования альтернативных источников энергии, например, выхлопных газов. В этой связи перспективным является проект альтернативного варианта абсорбционного водоаммиачного кондиционера автомобиля.

**Н**а железнодорожном и автомобильном транспорте можно существенно экономить топливо, если использовать безвозвратно теряемую тепловую энергию выхлопных газов. Для этого можно заменить широко используемые компрессионные кондиционеры сорбционными (адсорбционными [1, 2] или абсорбционными [3–9]). Кроме экономии топлива в этом случае также снизится тепловое загрязнение окружающей среды, и уменьшатся выбросы парникового газа (двуокиси углерода) в атмосферу.

Однако простая конструкция генератора пара, которая успешно использовалась в стационарных холодильных устройствах [6–9], может оказаться неприемлемой при эксплуатации на транспорте, где во время движения наблюдаются толчки и колебания. В результате жидкость в генераторе пара будет хаотично перемещаться во внутренней полости и затекать в конденсатор. Это может уменьшить производительность устройства или привести к сбою его работы.

Для исключения такой ситуации генератор пара предлагается снабдить подвижной ректификационной колонной, установленной при помощи специального демпферного устройства. Рассмотрим конструкцию усовершенствованного абсорбционного кондиционера и некоторых его узлов подробнее.

## Устройство абсорбционного кондиционера

Схема абсорбционного кондиционера показана на *рис. 1*. Устройство вклю-

чает в себя две основных части — контур хладона (аммиака) и контур водоаммиачного раствора.

Контур хладона состоит из последовательно соединенных между собой при помощи соединительных трубок генератора пара 2, дефлегматора 1, конденсатора 4, дроссельного вентиля 11, испарителя 12. Соединительные трубки имеют контрольные точки (т. 1–т.4), в которых измеряют параметры рабочего тела во время настройки кондиционера. Из испарителя газообразный аммиак через контрольную точку т. 4 поступает в адсорбер 17.

Контур водоаммиачного раствора включает (перечисление ведется по направлению протекания раствора) генератор пара 2, штуцер 25, установленный в нижней части генератора пара, рекуперативный теплообменник 14, вентиль водоаммиачного раствора 15, абсорбер 17, насос аммиачного раствора 18, снова рекуперативный теплообменник 14 и центральный штуцер 3 генератора пара 2. Соединительные трубки имеют контрольные точки т. 5–т.8.

Предлагаемая конструкция кондиционера имеет два трубчатых газожидкостных теплообменника 9 и 20. В 9 промежуточный теплоноситель (например, тосол) охлаждается потоком окружающего воздуха 7, во втором теплообменнике 20 другой промежуточный теплоноситель (например, трансформаторное масло) нагревается потоком выхлопных газов 19.

В известных конструкциях холодильных машин [7–10] генератор пара может состоять только из корпуса 2,

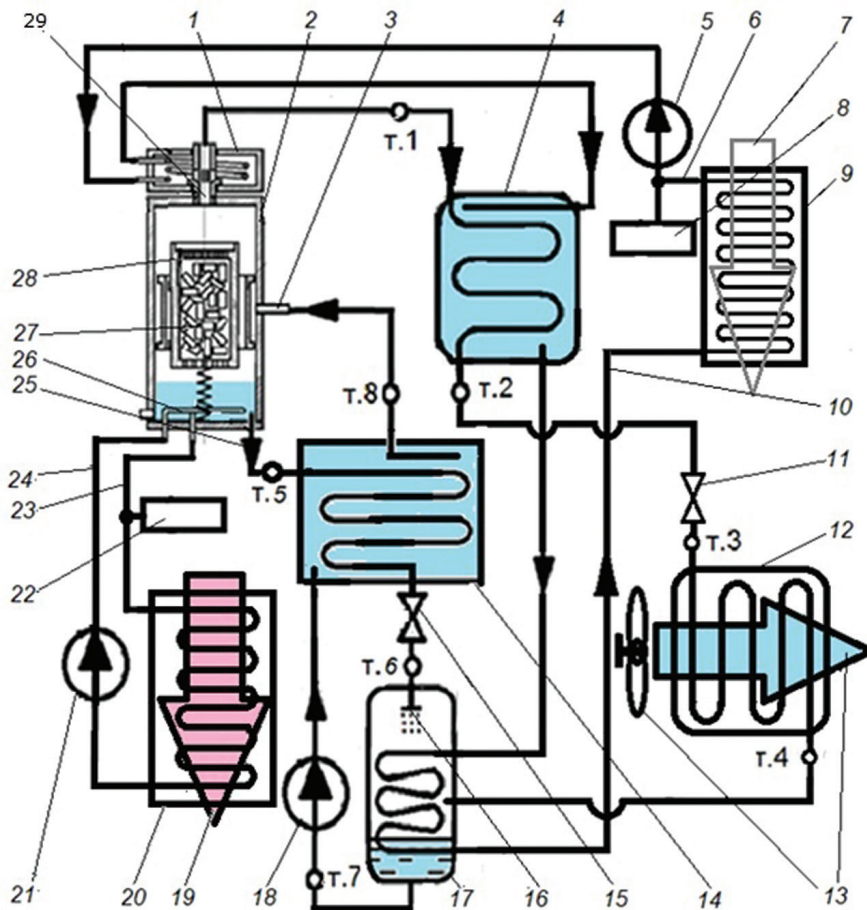


Рис. 1. Схема абсорбционного кондиционера:

1 – дефлегматор; 2 – корпус генератора пара; 3, 25, 29 – штуцеры для ввода в испаритель и вывода из него рабочей жидкости; 4 – конденсатор; 5 – насос низкотемпературного теплоносителя; 6, 10 – каналы для подвода и отвода теплоносителя с температурой окружающей среды; 7 – поток воздуха окружающей среды; 8, 22 – расширительные устройства; 9 – низкотемпературный теплообменник; 11 – дроссельный вентиль; 12 – испаритель (холодильная камера); 13 – система охлаждения и подачи воздуха в салон транспортного средства; 14 – рекуперативный теплообменник; 15 – вентиль водоаммиачного раствора; 16 – распылительная воронка; 17 – абсорбер; 18 – насос аммиачного раствора; 19 – поток выхлопных газов; 20 – высокотемпературный теплообменник; 21 – насос высокотемпературного теплоносителя; 23, 24 – каналы для подвода теплоносителя с температурой выхлопных газов; 26 – высокотемпературный нагреватель аммиачного раствора; 27 – насадка; 28 – ректификационная колонна

высокотемпературного нагревателя 26 и трех штуцеров: верхнего штуцера 29, служащего для выхода из генератора пара газообразного аммиака, среднего 3 – для входа водоаммиачного раствора и нижнего штуцера 25 – для выхода воды (с небольшой примесью аммиака).

Для исключения ситуации перемешивания рабочей жидкости в генераторе пара предлагается снабдить его подвижной ректификационной колонной 28, установленной при помощи специального демпферного устройства.

Ректификационная колонна 28 представляет собой цилиндрический сосуд, заполненный насадками 27 и закрытый с обеих сторон перфорированными крышками. Применение колонны будет способствовать более полному

разделению используемого раствора на его исходные компоненты – воду и аммиак, что должно повысить коэффициент полезного действия кондиционера.

### Описание работы кондиционера

Перед началом эксплуатации внутреннее пространство генератора пара и все полости, соединенные с ним, вакуумируются через специальные штуцеры (на рисунках не показаны) и заполняются необходимым количеством водоаммиачного раствора. Также заполняются жидкими теплоносителями высоко- и низкотемпературные теплообменники 20 и 9. После заполнения кондиционера рабочими жидкостями все предназначенные для этого штуцеры герметично закрываются, например, завариваются. В результате использу-

емые жидкости оказываются изолированными от окружающей среды и не оказывают на нее вредного влияния.

Для ввода кондиционера в работу необходимо включить насосы водоаммиачного раствора 18, горячего и холодного теплоносителя 5 и 21 и систему подачи воздуха 13 в салон транспортного средства. Водоаммиачный раствор забирается насосом 18 из абсорбера 17, прокачивается через высокотемпературный рекуперативный теплообменник 14 и поступает в генератор пара 2 через центральный штуцер 3. В генераторе пара водоаммиачный раствор за счет тепло- и массообмена на поверхностях насадок 27 разделяется на практически чистый аммиак (с малой примесью воды) и воду (с малой примесью аммиака).

Аммиак через верхний штуцер 29 в газообразном виде выходит из генератора пара 2 и попадает в дефлегматор 1, где одна его часть конденсируется и возвращается обратно в генератор пара. Вторая часть аммиака поступает в трубчатый конденсатор 4, где полностью конденсируется за счет отвода тепла к низкотемпературному теплоносителю, который охлаждается потоком окружающего воздуха в теплообменнике 9.

Далее образовавшийся жидкий аммиак преодолевает вентиль 11 и попадает в испаритель 12, при этом давление в аммиаке снижается, что вызывает его интенсивное испарение. На испарение аммиака расходуется большое количество тепла, что приводит к охлаждению теплообменных трубок в испарителе 12, а, следовательно, и к охлаждению потока воздуха, который продувается около этих трубок. Охлажденный воздух направляется в салон транспортного средства при помощи специального вентилятора и трубопроводов 13.

Образующийся в трубках испарителя 12 газообразный аммиак поступает в абсорбер 17, где поглощается каплями воды, возникающими при ее вытекании через специальную распылительную воронку 16. Вода в воронку поступает из генератора пара 2, через нижний вентиль 25, но перед входом в воронку вода охлаждается в рекуперативном теплообменнике 14 встречным потоком водоаммиачного раствора.

При абсорбции водой газообразного аммиака выделяется большое количество тепла, которое отводится низкотемпературным теплоносителем при

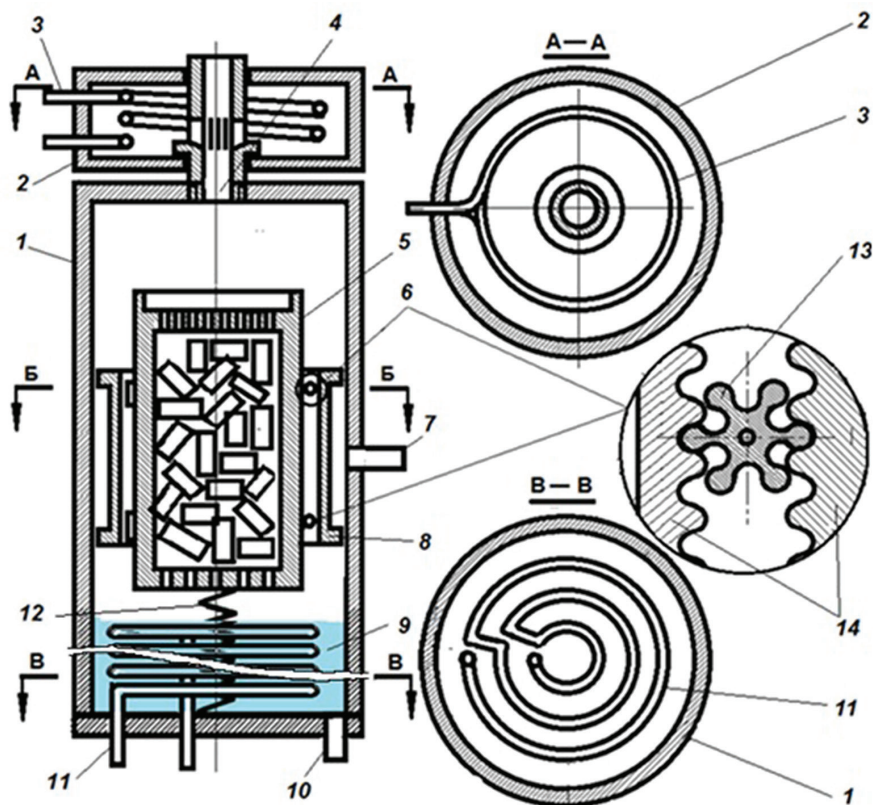


Рис. 2. Генератор пара

1 – корпус генератора пара; 2 – дефлегматор; 3 – теплообменник дефлегматора; 4 – штуцер для отвода газообразного аммиака; 5 – ректификационная колонна; 6 – передаточный механизм; 7 – штуцер для ввода аммиачного раствора; 8 – компенсационное загораждение; 9 – жидкий водоаммиачный раствор; 10 – штуцер для отвода воды; 11 – высокотемпературный нагреватель; 12 – упругий элемент (цилиндрическая пружина); 13 – шестеренка передаточного механизма; 14 – зубчатые рейки

помощи трубчатого теплообменника, помещенного в абсорбер 17. Образующаяся водоаммиачная смесь подается в генератор пара при помощи насоса 18.

Описанные процессы происходят в течение всего времени работы кондиционера. Температуру в салоне можно регулировать или системой подачи воздуха 13, или одним из вентилях 11 или 15.

### Модернизация конструкции генератора пара

Наиболее сложным элементом предлагаемого кондиционера является его генератор пара. Это связано с тем, что происходящие в нем процессы тепло- и массообмена, приводящие к разделению смеси на исходные компоненты, наиболее эффективно протекают в стационарном режиме. Колебания и толчки транспортного средства приводят к перемешиванию готовых веществ, что снижает производительность генератора пара или вообще не дает возможности для его работы.

Для устранения этого негативного явления предлагается дополнить

генератор пара ректификационной колонной, оснащенной специальным демпферным механизмом (рис. 2). Весь внутренний объем колонны заполнен контактными элементами в виде регулярной (вставной) или хаотической (насыпной) насадок, что будет являться препятствием для перемешивания жидкостей и заброса их в дефлегматор.

Предлагаемый оригинальный демпферный механизм генератора пара 1 содержит компенсационное загораждение 8, упругий элемент (цилиндрическую пружину) 12 и передаточный механизм 6, состоящий из шести шестеренок 13 (трех верхних и трех нижних), насаженных на три верхних и три нижние оси. Оси соединены отрезками проволоки и образуют два ломаных кольца, расположенных на верхней и нижней части колонны. Кольца закреплены на корпусе генератора пара при помощи радиальных стержней, которые свободно проходят через вертикальные прорези, сделанные в цилиндрической части компенсационного загораждения.

Зубья шестеренок 13 с противоположных сторон входят в пространство

между соседними зубьями зубчатых реек 14, которые вертикально закреплены на корпусе ректификационной колонны и на компенсационном ограждении.

Заметим, что передаточный механизм 6 связывает ректификационную колонну 5 и компенсационное загораждение 8 таким образом, чтобы обеспечить их синхронное движение в противоположных направлениях.

При передвижении автомобиля по ровной дороге или при его стоянке генератор пара не будет испытывать толчков и колебаний, и будет работать в расчетном стационарном режиме, который представляет собой процесс нагрева и испарения поступающего в ректификационную колонну водоаммиачного раствора. В результате происходит разделение смеси на воду и аммиак. Рабочий раствор в колонне нагревается от трубчатого нагревателя 11, через который прокачивается жидкий теплоноситель, нагреваемый выхлопными газами двигателя.

Высота ректификационной колонны должна быть достаточной для того, чтобы при тряске и колебаниях автомобиля, скапливающаяся практически чистая вода 9 в нижней части колонны не смогла преодолеть гидравлическое сопротивление насадки и попасть в дефлегматор 2. Расчет высоты колонны внесен в план дальнейшего научного исследования.

Описанное демпферное устройство позволяет при резких вертикальных колебаниях автомобиля существенно уменьшить их вредное влияние на работу ректификационной колонны. Кроме того, рассматриваемое компенсационное загораждение позволяет избежать дополнительных газовых потоков через ректификационную колонну, вызванных повышением и понижением давления над и под ректификационной колонной 5 при ее движении относительно корпуса 1. Для этого площадь поперечного сечения компенсационного загораждения делается равной поперечному сечению ректификационной колонны.

В верхней части генератора пара установлен дефлегматор 2 для конденсации части выходящего из генератора пара и возврата образовавшегося конденсата в ректификационную колонну 5. Возврат жидкости в генератор пара осуществляется самотеком. Эта часть жидкости называется флегмой.

**Влияние вибрации ректификационной колонны на ее работоспособность**

Сделаем оценку влияния сотрясений автомобиля, определив максимальное ускорение, при котором начинается ухудшение работы генератора пара. Пусть насадка в ректификационной колонне будет выполнена в виде набора проволочных сеток. При резком опускании автомобиля, а, следовательно, и генератора пара, нарушений в его работе может и не наблюдаться, так как отрыву капель жидкости с проволочных решеток (насадок) препятствует сила тяжести. При резком же подъеме автомобиля, а, следовательно, и генератора пара, возможно перетекание жидкости с верхних проволочных решеток на нижние. Механизм такого перетекания показан на рис. 3.

В наибольшей степени это будет сказываться на работе верхней части ректификационной колонны, так как там присутствует практически чистый аммиак, для которого поверхностное натяжение значительно меньше, чем для воды и водных растворов аммиака.

Нужно учесть, что процесс отрыва капли от цилиндрического подвеса, на который действует источник вибрационных воздействий, напрямую зависит от теплофизических и химических свойств материала насадок и рабочей жидкости [11].

При неподвижных ректификационной колонне и насадке (проволочных сеток) каждая проволока 1 покрыта слоем рабочей жидкости 2 (водоаммиачного раствора). При резком подъеме испарителя вверх становятся заметными инерционные силы. В результате в верхней части проволоки слой жидкости будет тоньше, а в нижней части — толще 3. Если деформация слоя жидкости оказывается небольшой, то под действием сил поверхностного натяжения жидкость остается или возвращается в свое исходное положение (рис. 3, а), и генератор пара продолжает свою работу в расчетном режиме. В противном случае жидкость не удерживается на поверхности, образуются капельки, которые отрываются от проволочной насадки.

Капельки формируются следующим образом: вначале возникает перетяжка (канавка) 4 вдоль оси проволоки (на рисунке не заметна), затем появляется перетяжка 5 поперек проволоки (рис. 3, в) и, наконец, формируется капля и ее отрыв 6 (рис. 3, г). Момент, когда начинает формироваться капля, можно определить из соотношения сил [11], действующих на жидкость:

$$2\sigma l = m(g + a), \tag{1}$$

где  $l$  — длина рассматриваемого участка проволоки, м;  
 $m = \pi(D^2/4 - d^2/4) l \rho = \pi d l s \rho$  — масса жидкости, которая может оторваться от проволоки и превратиться в каплю, кг;  
 $s = 0,5(D - d)$  — толщина слоя жидкости на проволоке, м;  
 $D, d$  — диаметр внешней поверхности слоя жидкости (рис. 3, а) и диаметр проволоки, м;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $a$  — ускорение, вызванное колебаниями ректификационной колонны, м/с<sup>2</sup>;  
 $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Выражение (1) можно переписать:

$$2\sigma l = \pi d l s \rho (g + a). \tag{2}$$

Разрешая уравнение (2) относительно  $a$ , получим:

$$a = \frac{2\sigma}{\pi d s \rho} - g.$$

Для расчета возьмем приближенные к модели численные значения физических параметров:

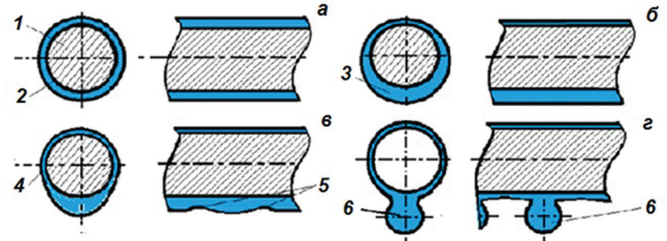


Рис. 3. Механизм стекания жидкости с проволочных решеток

1 — горизонтально расположенная проволока от насадки; 2 — слой рабочей жидкости; 3 — «натек» рабочей жидкости; 4, 5 — начало образования продольного и поперечного суживания жидкой пленки (не в масштабе) при формировании капель; 6 — конечная стадия образования капли

$$a = \frac{2 \cdot 0,022 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}}{3,14 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,68 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} - 9,81 \text{ м/с}^2} \approx 505 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, получено значение максимального ускорения ректификационной колонны, при превышении которого на работу генератора пара будет отрицательно влиять тряска автомобиля. Поскольку таких значений ускорения достичь при эксплуатации транспортного средства практически невозможно, то при выбранных параметрах насадки работа генератора пара будет стабильной.

Расчет ускорения произведен для регулярных насадок, изготовленных из тонкой проволоки диаметром 0,2 мм. Если же колонну заполнить насыпной насадкой из тонких трубок или колец диаметром, например, в 5 мм, то для ускорения получим отрицательную величину. При таких параметрах насадки ректификационная колонна работать не будет из-за непрерывного перемешивания рабочей жидкости.

**Оценка степени демпфирования колебаний ректификационной колонны**

Для оценки эффективности демпфирующего устройства рассмотрим ключевые параметры колебаний. Величину  $x$  вертикального перемещения ректификационной колонны (см. рис. 2) и ускорения, с которым она перемещается, можно определить по известному уравнению [12] для затухающих колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0 \sin(\Omega t)}{m}, \tag{3}$$

где  $F_0 \sin(\Omega t)$  — внешняя сила, вызванная тряской автомобиля, передаваемая от колес автомобиля к корпусу генератора пара и далее через цилиндрическую пружину на ректификационную колонну, Н;  
 $\Omega, \omega_0 = k/m$  — круговые частоты тряски автомобиля и собственных колебаний ректификационной колонны, с<sup>-1</sup>;  
 $k$  — коэффициент упругости пружины, Н/м;  
 $m$  — масса всех колеблющихся частей ректификационной колонны, кг;  
 $\beta = r/(2m)$  — коэффициент затухания, с<sup>-1</sup>;

$$F_r = r v, \tag{4}$$

$F$  — сила вязкого сопротивления, противодействующая перемещению ректификационной колонны относительно корпуса генератора пара, Н;  
 $r$  — коэффициент пропорциональности в соотношении (4) определяется вязким трением корпуса ректификационной колонны о внутреннюю поверхность генератора пара, кг/с;  
 $v = dx/dt$  — скорость перемещения ректификационной колонны относительно корпуса генератора пара, м/с.

Решением уравнения (3) является выражение:

$$x_d(t) = A \sin(\Omega t - \theta), \tag{5}$$

где

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}, \quad (6)$$

$A$  — амплитуда колебаний ректификационной колонны, м;  
 $\theta$  — постоянная интегрирования, рад.

Ускорение  $a_0$ , которое испытывает генератор пара и корпус автомобиля при его колебаниях (тряске) без использования демпферного механизма, можно найти их соотношения  $F_0 = ma_0$ , где  $x = x_0 \sin(\Omega t)$ :

$$a_0 = -x_0 \Omega^2 \sin(\Omega t). \quad (7)$$

Если использовать демпферное крепление ректификационной колонны к корпусу генератора пара, то сила, действующая на ее любой колеблющийся элемент и любой объем рабочей жидкости массой  $m_d$  будут равна:

$$F_d = m_d a_d,$$

где  $a_d$  — ускорение колеблющихся элементов при использовании демпфирующего устройства найдем, используя выражения (5) и (6):

$$a_d = \frac{d^2 x}{dt^2} = -A \Omega^2 \sin(\Omega t - \theta) = -\frac{F_0 \Omega^2 \sin(\Omega t - \theta)}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}$$

и с учетом (7)

$$a_d = -\frac{x_0 \Omega^4 \sin(\Omega t - \theta) \sin(\Omega t)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}.$$

Положительный эффект от используемого демпфирующего устройства может быть оценен коэффициентом

$$D = \frac{a_0}{a_d} = \frac{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}{\Omega^2 \sin(\Omega t - \theta)}.$$

Минимальная эффект демпфирования наступает при. В этом случае:

$$D = \frac{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}{\Omega^2}.$$

Когда круговые частоты тряски автомобиля и собственных колебаний ректификационной колонны равны или близки по значению, т.е. при самых неблагоприятных условиях работы устройства, коэффициент демпфирования будет равен:

$$D = \frac{2\beta}{\Omega}.$$

### Заключение

Предложенный абсорбционный кондиционер имеет особенности конструкции генератора пара, а именно, содержит ректификационную колонну,

заполненную контактными элементами и снабженную демпферным механизмом крепления. Таким образом, рабочая жидкость (водоаммиачная смесь) в генераторе пара подвержена более качественному разделению на исходные компоненты, что повышает эффективность работы данного кондиционера в условиях вибрации, которую испытывает автомобиль при эксплуатации.

Предварительные расчеты показали, что для ректификационной колонны наиболее удобно использовать насадки, изготовленные из проволочных решеток. В этом случае хаотичные течения жидкой фазы, возникающие при сотрясении, будут быстро затухать при их прохождении через узкие каналы проволочных решеток.

Демпферный механизм, с помощью которого установлена ректификационная колонна, позволяет смягчить негативное вибрационное воздействие, передающееся от ходовой части автомобиля в процессе эксплуатации. Определен коэффициент демпфирования, которым можно оценить положительный эффект от использования устройства.

Установка абсорбционного кондиционера целесообразна на транспортном средстве с двигателем внутреннего сгорания, так как вместе с выхлопными газами выбрасывается большое количество тепловой энергии, которую можно использовать в качестве альтернативы механической и электрэнергии, что в свою очередь является экологичным и энергоэффективным решением. ■

### Источники

1. Патент на изобретение RU 2692444 С1. Устройство для кондиционирования воздуха в транспортном средстве, содержащее адсорбционный тепловой насос / М. Цубоути. 24.06.2019. Заявка № 2018100720 от 11.01.2018.
2. Патент на изобретение RU 2832173 С1. Адсорбционный кондиционер / Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, А. Ю. Волкова. 20.12.2024. Заявка № 2023130060 от 17.11.2023.
3. Патент на изобретение RU 2758018 С1. Абсорбционный кондиционер автомобиля / Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, В. Г. Бондаренко. 25.10.2021. Заявка № 2021108012 от 24.03.2021.
4. Патент на изобретение RU 2787633 С1. Абсорбционный кондиционер ав-

томобили (варианты) / Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, В. Г. Бондаренко. 11.01.2023. Заявка № 2022124262 от 12.09.2022.

5. Буланов Н. В., Бондаренко В. Г., Авксентьева Е. И. Использование сорбционных кондиционеров на автомобилях с двигателями внутреннего сгорания // Транспорт Урала. 2022. № 3. С. 67–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-67-72.
6. Ilyin A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. Auto mobile Absorption Conditioner // Science and Technique. 2021. Vol. 20. № 5. P. 445–448. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448.
7. Патент на изобретение RU 2031327 С1. Абсорбционная холодильная установка / В. Д. Яблоков. 20.03.1995. Заявка № 5014527/06 от 03.07.1991.
8. Патент на изобретение RU 2029202 С1. Сорбционная холодильная машина / В. П. Латышев. 20.02.1995. Заявка № 5036342/06 от 06.03.1992.
9. Гринкруг М. С., Ткачева Ю. И., Сандалов И. В. Использование абсорбционного холодильного цикла для кондиционирования воздуха в автомобилях // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2021. С. 269–272. DOI: 10.17084/978-5-7765-1468-5\_2021\_269.
10. Богатырева Е. В. Влияние эксплуатационных параметров абсорбционной холодильной установки на зону дегазации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. С. 867–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-867-874.
11. Давлятшин Р. П., Перминов А. В., Баяндин Ю. В. и др. Моделирование влияния вибраций на поверхностное натяжение капли жидкости с применением бессеточных методов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 2. С. 73–84. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.2.07.
12. Пчелинцева Д. С., Прудников В. Я. Уравнение затухающих колебаний // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования: тезисы докладов юбилейной 70-й межвузовской студенческой научной конференции в 2 т. Хабаровск, 2012. С. 132.