УДК 579.69, 57.014. 613.842, 615.918

DOI: 10.18522/2308-9709-2025-52-4

Токсичность никотинсодержащих жидкостей для электронных систем доставки никотина

Чукарина К.С.[1]*, Карчава Ш.К.[1], Климова М.В.[1], Ажогина Т.Н.[1], Сазыкина М.А.[1], Сазыкин И.С.[1]

[1] *Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия; chukarina@sfedu.ru*

Аннотация

Повышающееся число никотинозависимых россиян, курящих вейпы, стало одной из проблем современного мира. Остро стоит вопрос о том, является ли курение электронных сигарет (вейпинг) безопасной альтернативой традиционному курению сигарет. В данной работе были исследованы генотоксичность и прооксидантные свойства 8 жидкостей для электронных систем доставки никотина (ЭСДН) с разными характеристиками, аэрозоли этих жидкостей, а также их компоненты (пропиленгликоль и глицерин). Биотестирование исследуемых веществ проводили с помощью батареи цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров. Среди всех исследуемых токсических эффектов чаще всего регистрировалось повреждение ДНК, реже всего – индуцирование окислительного стресса пероксидами.

Не обнаружено взаимосвязей между количеством токсических эффектов и содержанием никотина в жидкостях. Однако, вероятно, подобная связь существует со вкусовыми направлениями жидкостей, что может быть связано с недостаточным контролем за качеством ароматизаторов, входящих в их состав. Самыми токсичными жидкостями из отобранных для данного исследования оказались сладкие (Тропикал, Кактус и Клубника, Пепси, Розовый лимонад).

Аэрозоли основных компонентов жидкостей (глицерин и пропиленгликоль) для электронных систем доставки никотина обладают свойством повреждать ДНК и белки, а также способностью индуцировать окислительный стресс в клетках, поэтому даже безникотиновые жидкости не могут считаться безопасными для человеческого здоровья. Необходимо проведение дальнейших исследований, которые позволят прояснить конкретные механизмы токсичности жидкостей для ЭСДН.

Ключевые слова: жидкости для ЭСДН; электронные системы доставки никотина; вейп; глицерин; пропиленгликоль; цельноклеточные бактериальные биосенсоры; токсичность; генотоксичность; окислительный стресс.

ВВЕДЕНИЕ

По результатам социологических опросов, за последние несколько лет увеличилась доля никотинозависимых россиян, курящих вейпы. Если в 2019 году таких людей было около 8 %, то к 2023 году это число возросло до 21 % – более чем в два с половиной раза. Электронные испарители предпочитаются людьми молодого возраста (до 34 лет), а также несовершеннолетними подростками. С 2011 года, по данным Минздрава, количество никотинозависимых подростков выросло в 10 раз.

Многие курильщики в оправдание вейпинга приводят распространенный факт, что этот процесс гораздо безопаснее обычного курения, и, более того, может помочь в борьбе с никотиновой зависимостью. Является ли это верной точкой зрения? В литературном обзоре (Алехина и др.,

2018) представлен достаточно широкий перечень вредных веществ, содержащихся в жидкости для заправки электронных сигарет и в аэрозоле, образующемся при ее испарении, а также приведены данные о вызываемых аэрозолем цитотоксических и неблагоприятных клинических эффектах. Наряду с этим обсуждаются и потенциальные преимущества электронных сигарет перед обычными сигаретами, связанные с тем, что аэрозоль первых менее токсичен, чем дым последних. Завершается обзор несколько неожиданным выводом, не исключающим того, что курение электронных сигарет, возможно, не представляет никакой угрозы для здоровья: «На сегодняшний момент исследований, которые бы смогли полностью ответить на вопрос, можно ли использовать вейп как безопасный способ курения или нет, явно недостаточно».

Данная работа по исследованию токсичности жидкостей для электронных систем доставки никотина (ЭСДН) ставит своей целью подробнее изучить этот вопрос.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед проведением исследования был изучен рынок ЭСДН с целью выявить наиболее популярные варианты жидкостей среди потребителей. Всего было приобретено в случайных точках дистрибьюции продуктов для вейпа восемь жидкостей с разными характеристиками. Среди них: четыре жидкости на солевом никотине (содержание 20 мг/мл), две безникотиновые жидкости, одна жидкость на щелочном никотине (содержание 3 мг/мл) и одна жидкость на гибридном (смеси солевого со щелочным) никотине (содержание 20 мг/мл). Все жидкости содержали в своей основе смесь пропиленгликоля (ПГ) с глицерином (ГЛ) в соотношении 50 % ГЛ / 50 % ПГ, за исключением одной, основанной на смеси 70 % ГЛ / 30 % ПГ. Кроме того, жидкости были разделены по группам вкусовых направлений: четыре сладкие, три холодные и одна кислая.

Для детекции повреждений ДНК, вызванных алкилированием, использовали люминесцентные бактериальные биосенсоры: *E. coli* MG1655 (pAlkA-lux) – для выявления алкилирования ДНК, *E. coli* MG1655 (pRecA-lux) – для оценки активации SOS-ответа. Для обнаружения повреждений белков применяли биосенсор *E. coli* MG1655 (pIbpA-lux).

Для оценки окислительного стресса использовали: *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux) – детекция редокс-активных соединений и супероксид-аниона, *E. coli* MG1655 (pKatG-lux) – выявление пероксидов.

E. coli MG1655 (pXen7-lux) использовали для коррекции искажений, связанных с изменениями активности бактериальной люциферазы и не связанных с индукцией. Интегральную токсичность оценивали с помощью природного биосенсора *Vibrio aquamarinus* VKPM B-11245.

Подготовка образцов для исследования. В качестве растворителя для исследуемых жидкостей использовали дистиллированную воду. Все образцы были исследованы в разведениях 1:100, 1:1000, 1:10000.

Для получения аэрозоля жидкостей была собрана специальная установка. Она состоит из колбы Бунзена, электронного испарителя и вакуумного насоса. В качестве испарителя жидкости была использована модель PASITO II KIT (SMOANT, Китай) мощностью 60 Вт, растворителем для дыма был выбран ДМСО. Средний объем пропущенной через ЭСДН жидкости – 200 микролитров.

Помимо исследуемых жидкостей, также был получен аэрозоль пропиленгликоля, глицерина и смесей пропиленгликоля с глицерином (50 % ГЛ / 50 % ПГ, 70 % ГЛ / 30 % ПГ). Далее полученные образцы были исследованы в разведениях 1:100, 1:1000, 1:10000.

Определение токсичности жидкостей для ЭСДН с использованием lux-биосенсоров. Биотестирование исследуемых веществ проводили с помощью батареи цельноклеточных бактериальных lux-биосенсоров.

Ночную культуру биосенсорных штаммов выращивали в жидкой среде Луриа-Бертани (LB), содержащей 100 мкг/мл ампициллина, при 37 ºC. Затем разводили ее до концентрации 1×10^8 клеток/мл жидкой средой LB с ампициллином и инкубировали при 37 ºC в течение двух часов. В лунки 96-луночного планшета (Costar, Испания) вносили по 180 мкл бактериальной суспензии и 20 мкл соответствующих разведений исследуемых веществ. 20 мкл дистилированной воды вносили в качестве отрицательного контроля.

Измерение уровня биолюминесценции проводили на микропланшетном люминометре LM-01T (Immunotech) в течение двух часов с интервалом между измерениями в 10 минут при температуре 37 ºC (Sazykin et al., 2024).

Определение фактора индукции. В качестве меры токсичности, определяемой с помощью индуцируемых lux-биосенсоров, использовали истинный фактор индукции «I» ($I=F_i/K$), где F_i — фактор индукции, K – коэффициент подавления. Фактор индукции (F_i) определяли как отношение интенсивности свечения суспензии клеток lux-биосенсора с индуцируемым промотором в присутствии тестируемого соединения (L_c), к интенсивности свечения контрольной суспензии, не содержащей токсиканта (L_k): $F_i=L_c/L_k$. Коэффициент подавления свечения (К) определяли по формуле: $K = l_c/l_k$, где l_c — интенсивности свечения суспензии lux-штамма с конститутивным промотором в присутствии тестируемого соединения; l_k – интенсивность свечения контрольной суспензии.

При статистически значимом ($p < 0,05$) отличии опыта от контроля $I < 2$, обнаруженный токсический эффект оценивали как «слабый», при $2 \leq I \leq 10$ —

как «средний» и при I > 10 – как «сильный» эффект (Sazykin et al., 2024).

Определение индекса токсичности для *V. aquamarinus* VKPM B-11245. Индекс токсичности (Т) использовали в качестве показателя интегральной токсичности, оцениваемой по подавлению люминесценции в течение 30-минутного периода экспозиции. Индекс токсичности (Т), рассчитанный по формуле: $T = 100(I_k - I_o)/I_k$, где I_o – интенсивность свечения бактерий в исследуемом образце при фиксированном времени воздействия исследуемого раствора на тест-объект, а I_k – интенсивность свечения бактерий в контрольном образце при фиксированном времени воздействия исследуемого раствора на тест-объект. При $T < 20$ степень токсичности находится в допустимых пределах, при $20 \geq T < 50$ образец токсичен, а при $T \geq 50$ – высокотоксичен (Sazykin et al., 2024).

В каждом эксперименте опытные и контрольные образцы были исследованы в шести технических повторностях. Каждый эксперимент был выполнен в трех независимых биологических повторностях. Значения были выражены как среднее значение ± стандартное отклонение. Статистический анализ проводили с использованием GraphPad Prism 8.0.2 DEMO (GraphPad Software, Inc., SanDiego, США) с применением двустороннего дисперсионного анализа и определения критерия Стьюдента с 5 % значимостью ($p \leq 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Токсичность компонентов жидкостей для ЭСДН.

Результаты исследований токсичности аэрозолей компонентов жидкостей для ЭСДН и их смесей представлены на рисунке 1.

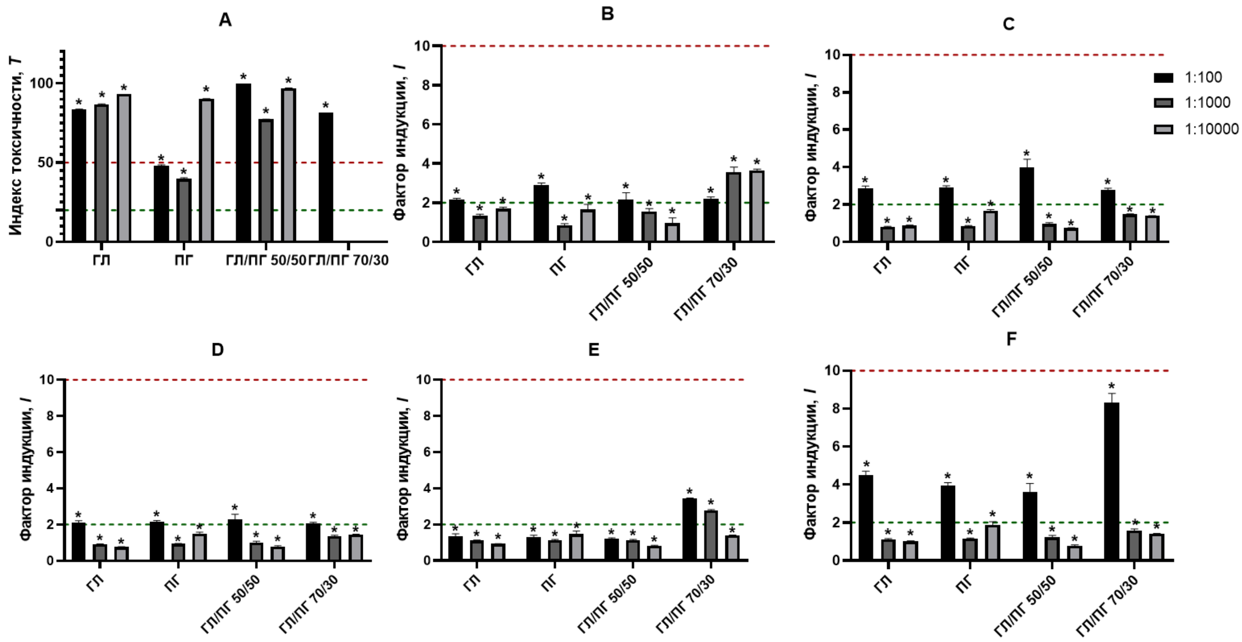

Рис. 1 – Токсичность аэрозолей компонентов жидкостей и их смесей, определенная с помощью различных биосенсорных штаммов: A – V. aquatarinus VKPM B-11245, B – E. coli MG1655 (pAlkA-lux), C – E. coli MG1655 (pRecA-lux), D – E. coli MG1655 (pIbpA-lux), E – E. coli MG1655 (pKatG-lux), F – E. coli MG1655 (pSoxS-lux). (– отличия от контроля статистически значимы, t-критерий; $p < 0.05$).*

Примечание (для рис. 1–3) – на графике A зеленой пунктирной линией указан порог допустимой токсичности вещества, красной пунктирной линией – порог, выше которого вещество считается высокотоксичным, образцы, находящиеся на графике между пунктирными линиями, являются токсичными; на графиках B–F токсические эффекты ниже зеленой пунктирной линии являются слабыми, от зеленой пунктирной линии до красной – средними, и выше красной пунктирной линии – сильными.

Аэрозоль глицерина оказался высокотоксичным во всех разведениях, а аэрозоль пропиленгликоля – только в наименьшем (1:10000). Тем не менее, аэрозоли смесей этих двух компонентов также являлись высокотоксичными, как при содержании глицерина и пропиленгликоля в соотношении 1:1, так и с преобладанием глицерина. Аэрозоли глицерина и пропиленгликоля по отдельности показали одинаковое количество токсических эффектов. Аэрозоль смеси, в которой было поровну глицерина и пропиленгликоля при общей более высокой интегральной токсичности показал меньше токсических эффектов, чем аэрозоль смеси, в которой преобладал глицерин. Примечательно, что аэрозоль жидкости, имеющей в своей основе соотношение глицерина и пропиленгликоля 70 % / 30 %, показал наименьшее количество токсических эффектов.

Глицерин и пропиленгликоль являются хорошо изученными веществами, и, благодаря своей доказанной безопасности, широко используются в качестве пищевых добавок и растворителей для лекарств. Однако все еще остается малоизученным вопрос безопасности аэрозолей этих компонентов при вдыхании, полученных через ЭСДН. В работе Komura et al. (2022) подвергали эпителиальные клетки мелких дыхательных путей человека воздействию аэрозолей глицерина и пропиленгликоля по отдельности. Согласно их результатам, эффект ингибирования пролиферации и снижения жизнеспособности клеток у аэрозоля пропиленгликоля оказался более выраженным, чем у аэрозоля глицерина. Кроме того, исследователи обнаружили генотоксический эффект, приводящий к остановке клеточного цикла в фазе G1 в клетках, после воздействия на них аэрозолем пропиленгликоля. Аналогичный эффект был обнаружен и после воздействия на клетки аэрозолем глицерина, но он оказался значительно менее выраженным. Это частично соответствует нашим результатам. Аэрозоль глицерина имеет более высокую интегральную токсичность, чем пропиленгликоль. Но аэрозоль пропиленгликоля превосходит аэрозоль глицерина по токсичности в опытах со специфическими генно-инженерными lux-биосенсорами. Вероятно, требуется более углубленное изучение токсичности этих компонентов.

Токсичность жидкостей для ЭСДН.

Результаты исследований токсичности жидкостей для ЭСДН и их аэрозолей представлены на рисунках 2–3**.**

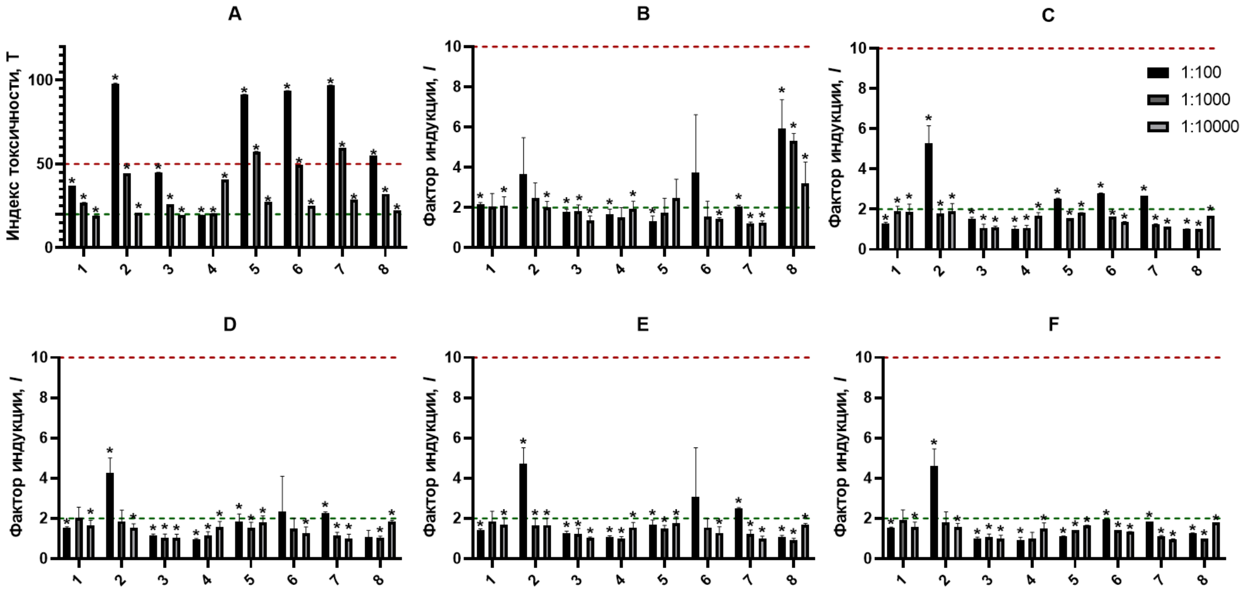

Рис. 2 – Токсичность жидкостей для ЭСДН, определенная с помощью различных биосенсорных штаммов: A – V. aquatarinus VKPM B-11245, B – E. coli MG1655 (pAlkA-lux), C – E. coli MG1655 (pRecA-lux), D – E. coli MG1655 (pIbpA-lux), E – E. coli MG1655 (pKatG-lux), F – E. coli MG1655 (pSoxS-lux). (– отличия от контроля статистически значимы, t-критерий; p < 0.05).*

По-видимому, каждая из исследуемых жидкостей является токсичной. Высокотоксичными оказались жидкости № 2, 5, 6, 7 и 8, преимущественно в разведении 1:100. Среди них жидкость № 2 в этом разведении показала средние токсические эффекты в опыте со всеми генно-инженерными биосенсорами, кроме *E. coli* MG1655 (pAlkA-lux), с помощью которого эффект был зарегистрирован для разведения 1:10000.

Жидкость № 7 также показала средние токсические эффекты со всеми биосенсорами, кроме *E. coli* MG1655 (pSoxS-lux), с которым такой эффект не был зарегистрирован. Жидкости № 5, 6 и 8 в разведении 1:100 вызвали эффект повреждения ДНК. Из этого можно сделать вывод, что жидкости для ЭСДН небезопасны для употребления непосредственно в жидкой форме.

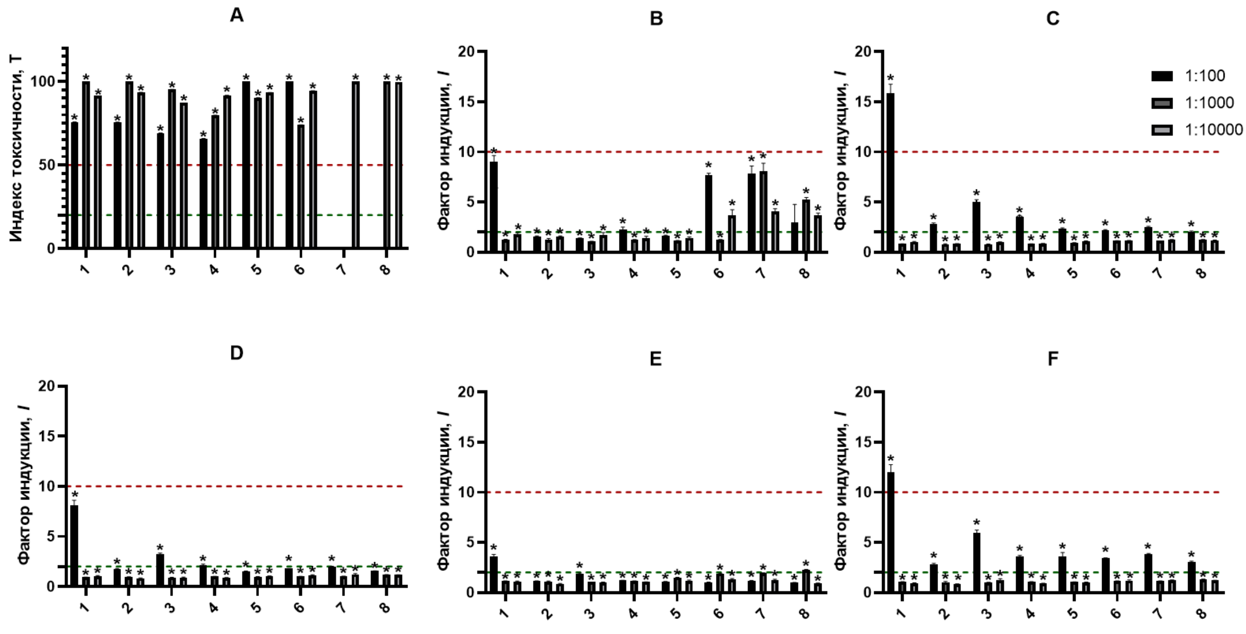

Рис. 3 – Токсичность аэрозолей жидкостей для ЭСДН, определенная с помощью различных штаммов: A – V. aquatarinus VKPM B-11245, B – E. coli MG1655 (pAlkA-lux), C — E.coli MG1655 (pRecA-lux), D – E. coli MG1655 (pIbpA-lux), E — E.coli MG1655 (pKatG-lux), F – E. coli MG1655 (pSoxS-lux). (– отличия от контроля статистически значимы, t-критерий; p < 0.05).*

Все исследуемые аэрозоли жидкостей для ЭСДН являлись высокотоксичными, за исключением некоторых разведений аэрозолей № 7 и 8, для которых эффект не был зарегистрирован.

Аэрозоль № 1 в разведении 1:100 проявил как средние, так и сильные токсические эффекты в исследовании с помощью каждого биосенсора, что вкупе с высокой интегральной токсичностью делает его потенциально самым опасным среди всех исследуемых образцов.

Эффект повреждения ДНК посредством алкилирования зарегистрировали для аэрозолей № 1, 4, 6, 7 и 8. Повреждение ДНК в целом вызывали аэрозоли всех исследуемых образцов. Эффект повреждения белков показали аэрозоли № 1, 3 и 4. Только аэрозоли № 1 и 8 вызывали пероксидный окислительный стресс, тогда как супероксидный окислительный стресс вызывали все исследуемые образцы.

Аналогичное данному исследование было проведено и с дымом от обычных сигарет Axelrod et al. (2021). Исследовали оценивали несколько токсикологических параметров, в том числе способность вызывать окислительный стресс с помощью штамма *E. coli* DPD2511, содержащего промотор katG; а также генотоксичность с использованием штамма *E. coli* DPD2794 с промотором recA. Согласно их результатам, нефильтрованный сигаретный дым индуцировал сильный окислительный стресс у бактерий.

По результатам данной работы, аэрозоли жидкостей для ЭСДН в основном не вызывали окислительный стресс с образованием пероксидов. В случаях, когда агенты окислительного стресса присутствовали в самой жидкости, они не обнаруживались в ее аэрозоле, что может говорить о разрушении некоторых агентов окислительного стресса при нагревании жидкости электронным испарителем. В исследовании генотоксичности для обычных сигарет Axelrod et al. (2021) также был обнаружен высокий токсический эффект, увеличивающийся с концентрацией дыма, не пропущенного через сигаретный фильтр. В нашем исследовании аэрозоли всех образцов вызывали подобный эффект, из чего можно сделать вывод о том, что курение вейпа не является безопасной альтернативой курению сигарет.

Ввиду невозможности адекватно оценить состав ароматизаторов в каждой отдельной жидкости для ЭСДН, некоторые исследователи задаются вопросом о том, каков их вклад в общую токсичность вейпов. В исследовании Rowell et al. (2017) клетки эпителия легких подвергали воздействию жидкостями для ЭСДН с одинаковым содержанием никотина (12 мг/мл), но с разными вкусами. В работе было выделено четыре вкуса, оказавшихся наиболее цитотоксичными (Банановый пудинг, Кола, Конфеты с корицей, Ментоловый табак). Все эти вкусы, кроме холодного ментолового табака, можно отнести к категории сладких. Один из исследуемых нами образцов содержал 12 мг/мл, имел сладкий вкус (Розовый лимонад) и обладал высокой интегральной токсичностью, вместе с этим показывая много токсических эффектов на других биосенсорах. Среди образцов с содержанием никотина 20 мг/мл имеется еще одна жидкость (Тропикал), аэрозоль которой оказался самым токсичным. К этой же категории относится образец, который обладал высокой токсичностью в жидкой форме, и он тоже относится к сладким (Кактус и клубника). Эти данные позволяют предположить, что некоторые жидкости для ЭСДН токсичнее других из-за содержащихся в них ароматизаторов.

В работах иностранных исследователей можно найти попытки биотестирования жидкостей для ЭСДН с помощью биосенсоров. Bharadwaj et al. (2017) использовали стресс-специфические биолюминесцентные рекомбинантные бактериальные клетки, предназначенные для детекции повреждения ДНК (*E. coli*-RecA), окислительного стресса (*E. coli*-SodA) и повреждения мембран (*E. coli*-DMO1). В работе исследователи подтвердили свое предположение о том, что из-за своей высокой токсичности жидкости для

ЭСДН могут повреждать ДНК и подавлять рост клеток, нарушая клеточные функции, такие как защиту от АФК ингбированием супероксиддисмутазы, что объясняет феномен окислительного стресса в клетках, который мы наблюдали с исследуемыми образцами жидкостей. Кроме того, в работе было подтверждена фрагментация клеточной ДНК под действием жидкостей для ЭСДН. Активацию SOS-ответа, вызываемую разрывами нитей ДНК, мы наблюдали с аэрозолями всех исследуемых образцов в опыте с *E. coli* MG1655 (pRecA-lux). Однако, согласно литературным данным, эффект повреждения ДНК может зависеть от прочих параметров, например, от способа курения вейпа, и поэтому он нуждается в дальнейшем изучении (Farsalinos et al., 2015).

Еще одна недавняя работа Al-Otaibi et al. (2024) ставила целью изучение мутагенного потенциала жидкостей для ЭСДН. При этом, для моделирования метаболической функции печени млекопитающих, использовали фракцию S9 из печени крысы. Тест на генотоксичность проводился с помощью бактериального lux-биосенсора *E. coli* PQ37. В присутствии фракции S9 авторы обнаружили промутагенную активность в трех образцах из восьми жидкостей для ЭСДН. В нашем исследовании также была выявлена генотоксичность жидкостей для ЭСДН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были обнаружены различные токсические эффекты жидкостей для ЭСДН. Показано, что аэрозоли компонентов жидкостей для ЭСДН (пропиленгликоль и глицерин), а также аэрозоли их смесей являются токсичными и могут вызывать повреждение ДНК, повреждение белков и окислительный стресс в клетках.

Сами по себе жидкости для ЭСДН являются токсичными – они могут вызывать повреждение ДНК, белков, а также окислительный стресс в клетках (преимущественно связанный с образованием пероксидов). Наибольшая токсичность была установлена для жидкости № 2, наименьшая – для жидкости № 3.

Аэрозоли жидкостей для ЭСДН являются высокотоксичными, и могут вызывать повреждение ДНК, повреждение белков и окислительный стресс в клетках (преимущественно связанный с образованием супероксидов). Среди аэрозолей самыми токсичными оказались аэрозоли жидкости № 1, жидкости № 4 и жидкости № 8. Наименее токсичными были аэрозоли жидкости № 2 и жидкости № 5. Однако, стоит учитывать, что жидкости с самой низкой токсичностью все еще остаются небезопасными для здоровья человека.

Вероятно, имеется связь между токсичностью жидкостей для ЭСДН и входящими в их состав ароматизаторами. Необходимо проведение дальнейших исследований, которые позволят углубиться в конкретные механизмы токсичности жидкостей для ЭСДН.

СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Финансирование работы – работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2024-0026.

Соблюдение этических стандартов – настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Конфликт интересов – авторы отрицают наличие конфликта интересов.

Toxicity of nicotine-containing liquids for electronic nicotine delivery systems

Chukarina K.S.[1]*, Karchava Sh.K.[1], Klimova M.B.[1], Azhogina T.N.[1], Sazykina M.A.[1], Sazykin I.S.[1]

[1]*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation;* *chukarina@sfedu.ru*

Abstract

The increasing number of nicotine-addicted Russians who smoke vapes has become one of the problems of the modern world. There is an urgent question about whether smoking electronic cigarettes (vaping) is a safe alternative to traditional cigarette smoking. In this study, genotoxicity and pro-oxidant properties of 8 liquids for electronic nicotine delivery systems (ENDS) with different characteristics, aerosols of these liquids, as well as their components (propylene glycol and glycerin) have been studied. Biotesting of the studied substances was carried out using a battery of whole-cell bacterial lux biosensors. Among all the studied toxic effects, DNA damage was most often recorded, and the induction of oxidative stress by peroxides was the least frequent. No connection was found between the number of toxic effects and the nicotine content in liquids. However, it is likely that a connection exists with the flavors of liquids, which may be due to insufficient quality control of the flavoring materials included in their composition. The most toxic liquids selected for this study turned out to be sweet (Tropical, Cactus and Strawberry, Pepsi, Pink lemonade). Aerosols of the main components of liquids (glycerin and propylene glycol) for electronic nicotine delivery systems have the property of damaging DNA and proteins, as well as the ability to induce oxidative stress in cells, so even nicotine-free liquids cannot be considered safe for human health. Further studies are needed to clarify the specific toxicity mechanisms of liquids for ENDS.

Keywords: liquids for ENDS; electronic nicotine delivery systems; vape; glycerin; propylene glycol; whole-cell bacterial biosensors; toxicity; genotoxicity; oxidative stress.

ЛИТЕРАТУРА:

Алехина А. В., Честных Е. В., Карташева Ю. Н., Курицына И. Ю. Электронные сигареты: потенциальные выгоды и риски использования (обзор литературы) // Верхневолжский медицинский журнал. – 2018. – Т. 17. – №. 4. – С. 32–36.

Al-Otaibi H. M., Baqasi A. M. S., Alhadrami H. A. Genotoxicity and mutagenicity assessment of electronic cigarette liquids // Annals of Thoracic Medicine. – 2024. – V. 19. – №. 3. – P. 222–227.

Axelrod T., Eltzov, E., Lerman, M., Harpaz, D., Marks, R. S. Cigarette smoke toxicity modes of action estimated by a bioluminescent bioreporter bacterial panel // Talanta. – 2021. – V. 226. – P. 122076.

Bharadwaj S., Mitchell R. J., Qureshi A., Niazi J. H. Toxicity evaluation of e-juice and its soluble aerosols generated by electronic cigarettes using recombinant bioluminescent bacteria responsive to specific cellular damages // Biosensors and Bioelectronics. – 2017. – V. 90. – P. 53–60.

Farsalinos K. E., Voudris V., Poulas K. E-cigarettes generate high levels of aldehydes only in ‘dry puff’conditions // Addiction. – 2015. – V. 110. – №. 8. – P. 1352–1356.

Komura M., Sato T., Yoshikawa H., Nitta N. A., Suzuki Y., Koike K., Kodama Y., Seyama K., Takahashi K. Propylene glycol, a component of electronic cigarette liquid, damages epithelial cells in human small airways // Respiratory Research. – 2022. – V. 23. – №. 1. – P. 216.

Rowell T. R. Reeber S. L., Lee S. L., Harris R. A., Nethery R. C., Herring A. H., Glish G. L., Tarran R. Flavored e-cigarette liquids reduce proliferation and viability

in the CALU3 airway epithelial cell line // American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology. – 2017. – V. 313. – №. 1. – P. L52–L66.
Sazykin I., Naumova, E., Azhogina, T., Klimova, M., Karchava, S., Khmelevtsova, L., Chernyshenko E., Litsevich A., Khammami M., Sazykina M. Glyphosate effect on biofilms formation, mutagenesis and stress response of *E. coli* // Journal of Hazardous Materials. – 2024. – V. 461. – P. 132574.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2025 г.
Поступила после доработки 3 июня 2025 г.
Принята к печати 12 июня 2025 г.
Received June 2, 2025
Revised June 3, 2025
Accepted June 12, 2025